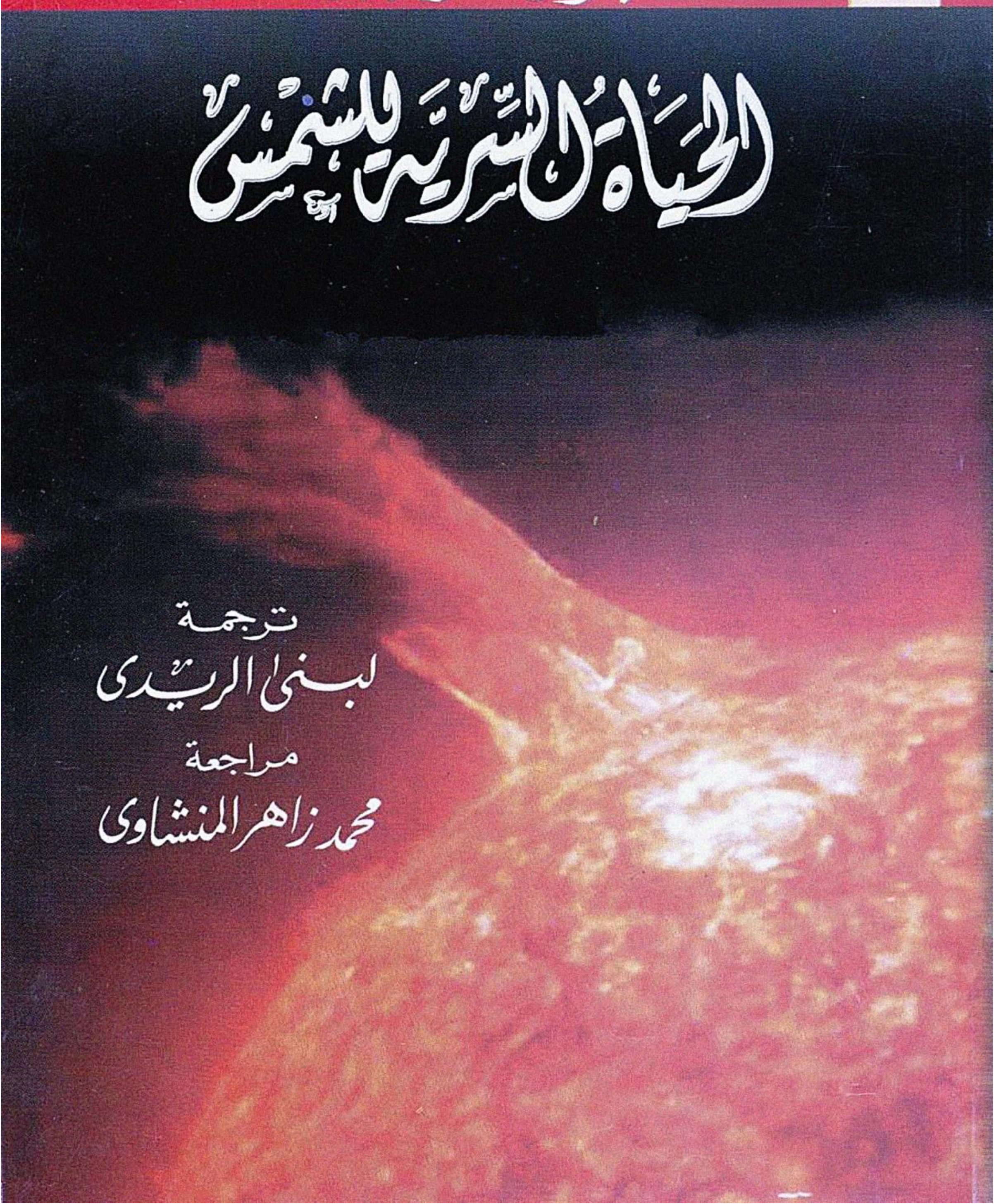
الألف كتاب

چون جريبين

الحياة السرية للشمس



ترجمة

لبنى الريدى

مراجعة

محمد زاهر المنشاوى

الحياة السرية للشمس

• الكتاب: الحياة السرية للشمس

BLINDED BY THE LIGHT

• الكاتب: جون جريبين John Gribbin

• الكتاب الأصلى صادر باللغة الإنجليزية ويصدر باللغة العربية بإذن خاص

• الطبعة الأولى: ٢٠٠٨

• طبع فى مطابع الهيئة المصرية العامة للكتاب

كورنيش النيل، رملة بولاق، القاهرة.

ت:٢٥٧٧٥٢٢٨/٢٥٧٧٥٠٠٠.

فاكس: ٢٥٧٥٤٢١٣(٠٠٢٠٢)

ص.ب: ٢٣٥ـ الرقم البريدى:١١٧٩٤رمسيس

WWW.egyptianbook.org.eg

E-maii:info@egyptianbook.org.eg

جريبين، جون.

الحياة السرية للشمس/ جون جريبين؛ ترجمة لبنى الريدى؛ مراجعة محمد زاهر المنشاوى.القاهرة ــ الهيئة المصرية العامة للكتاب، ٢٠٠٨. ٢٧٢ ص؛ ٢٤سم.

تدمك ٩٧٨ ٩٧٧ ٤٢٠ ٤٩٣ ٨

١ ــ الشمس

أ ــ الريدى، لبنى (مترجم)

ب ــ المنشاوى، محمد زاهر

ج ــ العنوان

رقم الإيداع بدار الكتب ١٦٧٥٦ / ٢٠٠٨

I.S.B.N - 978 – 977 – 420 – 493 –8

ديوى ٥٢٣,٧

چون جريبين

الحياة السرية للشمس

ترجمة

لبنى الريدى

مراجعة

محمد زاهر المنشاوى

الهيئة المصرية العامة للكتاب
٢٠٠٨

الألف كتاب فى سطور .....

صدر مشروع الألف كتاب الأول عام ١٩٥٥ بإشراف الإدارة العامة للثقافة، التابعة لوزارة التربية والتعليم. وقد اهتم بأمهات الكتب العالمية والكلاسيكيات، كما شمل العلوم البحتة، والعلوم التطبيقية، والمعارف العامة، والفلسفة وعلم النفس، والديانات، والعلوم الاجتماعية، واللغات، والفنون الجميلة، والأدب بفروعه، والتاريخ والجغرافيا والتراجم. وتوقف العمل به عام ١٩٦٩.

صدر مشروع الألف كتاب الثانى عام ١٩٨٦عن الهيئة المصرية العامة للكتاب. وقد اهتم بترجمة الكتب الحديثة محاولةً منه للاتصال بالثورة العلمية والثقافة العالمية المعاصرة.

وقد قُسمت إصدارات المشروع إلى ١٩ فرعًا هى: الموسوعات والمعاجم، والدراسات الاستراتيجية وقضايا العصر، والعلوم والتكنولوجيا، والاقتصاد والعلوم الإدارية، ومصر عبر العصور، والكلاسيكيات، والفن التشكيلى والموسيقى، والحضارات العالمية، والتاريخ، والجغرافيا والرحلات، والفلسفة وعلم النفس، والعلوم الاجتماعية، والمسرح، والطب والصحة، والآداب واللغة، والإعلام، والسينما، وكتب غيرت الفكر الإنسانى، والأعمال المختارة.

(أنظر القائمة آخر الكتاب)

الفهـرس

المقدمة

لقد احتفظت الشمس دائمًا بأسرارها. فمنذ أقل من مائة عام مضت، لم يكن أحد يعرف كيف تحتفظ الشمس بحرارتها، ولا حتى بشكل عام. ومنذ فترة أقل من عمر إنسان، لم يكن أحد يعرف ممَّ تتكون الشمس. وقبل خمسين عامًا فقط بدأت تفاصيل العمليات النووية التى توقد الشمس تصبح واضحة. ولعدة قرون، كان التقدم بطيئًا، بدرجة مؤلمة، نحو فهم فلكى للعمليات التى تتم فى عمق الشمس. وكان التقدم بطيئًا لسبب يدعو للسخرية.

إن شمسنا مجرد نجم، مثلها مثل العديد من النجوم الأخرى التى نراها فى السماء ليلاً، وإن كانت تبدو لنا ساطعة لهذه الدرجة فلأنها ببساطة قريبة جدًا منا، فهى تقع على بعد ١٥٠ مليون كيلومتر، ولأنها قريبة جدًا وسطحها شديد السخونة (حوالى ست ...ف درجة مئوية)، فإنها تلمع بضوء مبهر، ومن السهل على علماء الفلك دراسة سطح نجمنا الجار وغلافه الجوى. لكن دراسة الأجزاء الداخلية العميقة من الشمس أمر مختلف تمامًا، وذلك هو العمل الذى أصفه هنا.

ليس فقط علماء الفلك، ولكن أدواتهم أيضًا، ستُصاب بالعمى من الضوء المنبعث من «سطح» الشمس إذا حدقوا فيه طويلاً. إن شدة سطوع السطح تساعد على إخفاء المعالجات التى تتم فى أعماق الشمس، وتقول لنا فقط إن شيئًا ما، فى أعماقها، يولِّد بالفعل كميات ضخمة من الطاقة. إن رواد الفيزياء الفلكية ـ التى تدرس عمل النجوم ـ ما كانوا ليحلموا قط أنهم سيتمكنون يومًا من رؤية داخل قلب الشمس، ويجرون

قياسات مباشرة للظروف هناك. لكن تم فى السنوات الأخيرة تطوير عمليتين منفصلتين ومستقلتين تمامًا لسبر داخل الشمس. وتتضمن هاتان العمليتان تطورات غريبة، مثل تلسكوب مدفون بأعماق منجم تحت سطح الأرض، وأدوات شديدة الحساسية لدرجة أنها تستطيع قياس ذبذبات تحرك رقعًا من سطح الشمس إلى الداخل والخارج لمسافة عشرات الأمتار. والشىء الأكثر غرابة، أن بعض تلك الدراسات الجديدة للظروف فى قلب الشمس قد تخبرنا بأشياء مهمة عن تطور الكون ككل وعن مصيره النهائى.

ونحن على مشارف الألفية الثالثة لم يعد الضوء المنبعث من سطح الشمس يعمى علماء الفلك، فقد أصبحوا قادرين على قياس ما يحدث فى قلبها مباشرة. إن هذا الكتاب يحكى قصة كيف بدأ رواد الفيزياء الفلكية كشف أسرار الشمس، ويشير إلى الطريق الذى ستسلكه سُبُل سبر داخل الشمس فى السنوات والعقود القادمة.

چون جريبين

الفصل الأول

تاريخ قديم

لقد أثارت الشمس خيال الجنس البشرى كما لم يثره شىء آخر. فى الأزمنة الأولى، انت تُعبد باعتبارها إلهًا حيث أدرك أسلافنا بوضوح أن الشمس تجلب الحياة لكوكب الأرض والنماء للكائنات. اعتقد القدماء أن الشمس كرة من نار، تسافر عبر سماء كوكبنا الأرض نهارًا، وتعود خلال الليل إلى نقطة بدايتها، عبر ممرات وكهوف تحت الأرض، لتستعد للفجر التالى. وفى القرن الخامس قبل الميلاد، قام الفيلسوف اليونانى الأثينى أناكزاجوراس(*) (Anaxagoras) بأول محاولة مسجلة لوضع تلك الأفكار فيما يمكن اعتباره أساسًا علميًا فى الوقت الحاضر. لقد كان تفكيره العلمى جيدًا تمامًا، غير أن الوقائع التى رصدها واعتمد عليها فى تفكيره كانت للأسف ناقصة، وبالتالى انتهت أفكاره عن الشمس نهاية مُضلِّلة للغاية، عند النظر إليها بمنظورنا الآن. إلا أن أناكزجواراس يستحق مكانة مميزة لأنه على الأقل قدم جهدًا لفهم الشمس كظاهرة طبيعية تخضع للقوانين نفسها التى يخضع لها باقى الكون، ولم يتعامل معها كشىء خارق للطبيعة يستعصى على فهم البشر.

وكان سقوط أحد النيازك ذات يوم فى منطقة بين الرافدين من الأشياء التى جعلت أناكزاجوراس يبدأ التفكير فى طبيعة الشمس. ولما كان النيزك ساخنًا، فقد فكر

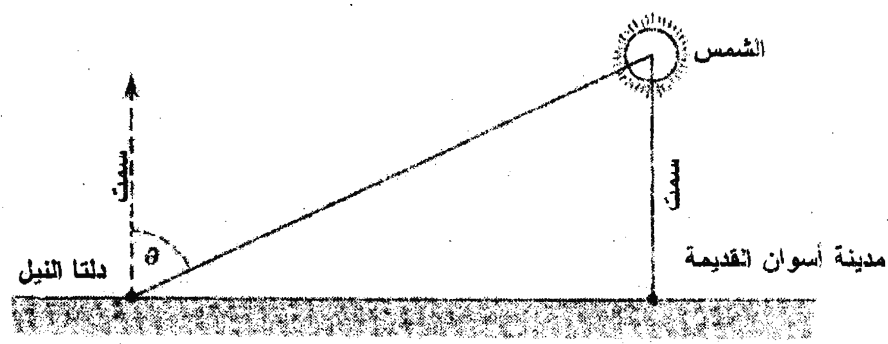
(*) أناكزاجوراس (٥٠٠ ـ ٤٢٨ ق.م) فيلسوف يونانى كان يدرِّس فى أثينا وتتلمذ عليه العديد من القادة. (المراجع).

الفيلسوف أنه لا بد أن يكون قادمًا من الشمس. ولأن النيزك يحتوى على حديد، فلا مفر من استنتاج أن الشمس أيضًا تتكون من الحديد. وكان وصف الشمس بأنها كرة من الحديد الساخن الأحمر تتحرك عاليًا فوق الأرض، وتستطيع بالطبع توفير الدفء النابع منها وتكون سببًا فى دورة الليل والنهار - يُعد وصفًا مقبولاً طبقًا لما كان يعلمه الجميع فى تلك الأيام. ومن ثم يمكن أن يعتبر علماء العصر الحديث هذا الوصف للشمس، بمقاييس عصره، فرضية طيبة للعمل، وقاعدة لمزيد من البحث والدراسة. لكن مثل كل الفرضيات العلمية الجيدة، آثارت هذه الفرضية أسئلة جديدة كان على الفلاسفة أن يحاولوا الإجابة عنها، مثل: ما حجم كرة الحديد الأحمر الساخن؟ وعلى أى بعد تتحرك هذه الكرة فوق الأرض؟

فى تلك الأيام، كان الفلاسفة، فى الواقع، لا يقومون كثيرًا بالتجربة والمشاهدة بأنفسهم. كانوا يستمعون إلى تقارير عن ظواهر طبيعية مثيرة، ثم يحاولون ملاءمة الأجزاء المختلفة للدليل المنقول والمسموع من الغير لتكوين صورة متماسكة ومقنعة. فعلى سبيل المثال، لم يسافر أناكزاجوراس قط إلى الجزء العلوى من نهر النيل، ولكنه سمع تقارير من رحالة ذهبوا إلى هناك. حيث قالوا إن الشمس فى مدينة سيين(*) التى كانت تقع قرب الموقع الحالى لسد أسوان، تكون فى كبد السماء فى الظهر ولا تلقى بأى ظل، وذلك فى يوم الانقلاب الصيفى (وهو أطول يوم). ربما لم يكن أناكزاجوراس رحالة ولم يعتمد على التجربة، لكنه كان يعرف جيدًا قوانين الهندسة، كما كان يعرف أن الشمس عند الظهيرة فى يوم الانقلاب الصيفى عند دلتا النيل، أى على بعد حوالى ٥٠٠ ميل شمال مدينة أسوان القديمة، تصنع مع الاتجاه الرأسى زاوية تُقدر بحوالى سبع درجات. وبما أنه كان «يفترض» أن الأرض مسطحة، أمكنه أن يحسب بسرعة ارتفاع الشمس فوق الأرض، مستخدمًا الخواص الهندسية الدقيقة للمثلثات القائمة الزاوية (شكل ١ - ١)، ووجد أن الشمس تقع على بعد أربعة آلاف ميل فوق رؤوس المراقبين فى مدينة أسوان القديمة.

ولأنه كان يعلم أيضًا الحجم الظاهرى للشمس (نصف قطرها الزاوى حوالى نصف درجة)، أمكنه أن يحسب، من خلال هندسة المثلثات، الحجم الفعلى للشمس لكى تظهر لعيوننا بالحجم الذى نراه. وكان تقديره، أن قطر الشمس حوالى ٣٥ ميلاً، وهو ما يعنى أن حجمها يماثل لدرجة كبيرة حجم بيلوبونيزوس، شبه الجزيرة الجنوبية لليونان.

(*) الإسم القديم لمدينة أسوان (المراجع).



شكل (١ ـ ١) مفترضاً أن الأرض مسطحة، ومستخدماً هندسة المثلثات القائمة الزاوية، قدر أناكزاجوراس فى القرن الخامس قبل الميلاد أن الشمس يجب أن تكون على ارتفاع أربعة آلاف ميل فوق رؤوسنا.

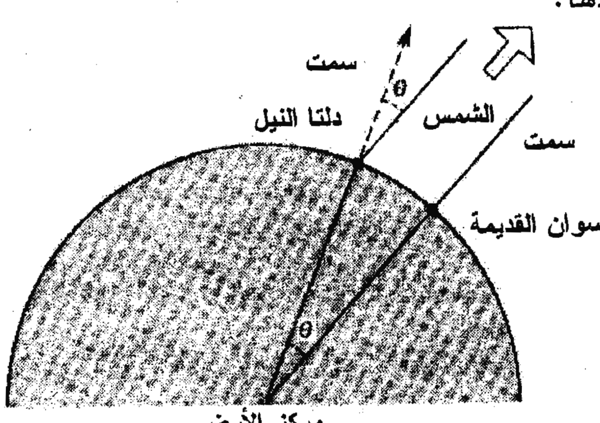
وكان ذلك الطرح مدمراً فى يونان القرن الخامس قبل الميلاد، حيث أحدث صدمة، فاعتُقل أناكزاجوراس فى أول الأمر بتهمة الهرطقة، ثم تم نفيه بعد ذلك مدى الحياة من مدينة أثينا موطنه ـ وهى معاملة شبيهة جداً بالمصير الذى عانى منه جاليليو على أيدى السلطات الدينية فى زمانه، عندما تجرأ هو أيضاً وافترض أن الشمس ظاهرة طبيعية. مع أن ذلك حدث بعد مرور أكثر من ألفىْ عام على حادثة الفيلسوف الإغريقى، أى فى القرن السابع عشر. وطوال هذا الوقت، من زمن أناكزاجوراس إلى جاليليو، لم يحاول أحد، على حد علمنا، أن يفهم الشمس من منظور علمى ـ فيا لها من عصور مظلمة! لكن حتى فى القرن العشرين، حيث يروق لنا الاعتقاد بأننا نتمتع بفكر مفتوح أكثر من العصور السابقة، وأن فهمنا للكون الذى نعيش فيه أفضل من فهم أسلافنا، فمن المفيد التفكير فى مثال أناكزاجوراس بجدية، فحتى أخطاؤه يمكن أن تعلمنا الكثير عن العلم، وعن مخاطر الرضا عن النفس.

إن تصوُّر الشمس ككرة من الحديد الأحمر الساخن تصور معقول تماماً فى ذلك الزمن، ولا يمكن أن يُعاب على أناكزاجوراس ذلك. ولا غبار أيضاً على حسابه الهندسى لارتفاع الشمس فوق كوكب الأرض المسطح. لكن خطأه الكبير هو التسليم بأن «ما يعرفه الجميع» هو الحقيقة ـ وأن كوكب الأرض مسطح. وبعد مائتى عام، استخدم فيلسوف إغريقى آخر هو إراتوستينس(*) (Eratosthenes) الدليل نفسه لحساب قطر

(*) إراتوستينس (٢٧٦ ـ ١٩٤ ق.م.) عالم فلك وباحث يونانى وُلد فى سيرين (برقة)، وكان يكتب الشعر ويمارس الأدب والمسرح والرياضيات، وحاول قياس محيط الكرة الأرضية عن طريق تعامد الشمس وقت الظهيرة فى يوم واحد فى الإسكندرية وأسوان عندما تكون الشمس عمودية على مدار السرطان. (المراجع).

كوكب الأرض الكروى، وحيث افترض أناكزاجوراس أن الأرض مسطحة واستنتج بناء على ذلك أن الشمس ترتفع فوقنا بمسافة أربعة آلاف ميل فقط، افترض إراتوسثينس أن الشمس بعيدة جدًا عن الأرض بحيث إن أشعة الضوء القادمة منها تصل الأرض فى خطوط متوازية، واستخدم الزاوية التى تكونها الشمس مع العمودى فى يوم الانقلاب الصيفى، كما تُرى من دلتا النيل، لحساب قُطر كوكب الأرض (شكل ٢ ـ ١). ولأن الزاوية التى تضمنها الحساب الهندسى واحدة، فلقد حصل على «الإجابة» نفسها، وهو أربعة آلاف ميل، لكنه فسر هذه النتيجة على أنها نصف قطر كوكب الأرض، وليس ارتفاع الشمس فوق الأرض. ولدينا الآن قدر كبير من الأدلة التى تثبت أن إراتوسثينس كان تقريبًا على صواب فى تفكيره.

لكن المعنى والحكمة من هذه القصة ليسا أن أناكزاجوراس كان على «خطأ» وأن إراتوسثينس كان على «صواب». إن العلماء الجيدين لا ينظرون حتى إلى أفضل نظرياتهم باعتبارها «صوابًا» بأى معنى مطلق. فهناك ببساطة نظريات جيدة وأخرى رديئة. والنظريات الجيدة هى التى تسمح لك بأن تقدم تنبؤات دقيقة حول سلوك الأشياء فى الواقع، فيما تؤدى النظريات الرديئة إلى تنبؤات غير دقيقة، أو ليست جديرة بالثقة. إن أفضل النظريات، مثل النسبية العامة، جيدة جدًا بالفعل لأنه لم يثبت أبدًا أنها قدمت تنبؤات غير دقيقة. ولكن حتى النظريات الأقل، مثل نظرية نيوتن الخاصة بالجاذبية الأرضية، فإنها ملائمة تمامًا للعديد من الأغراض شريطة أن يتم فهم قيودها وحدودها.



شكل ٢ ـ ١ بافتراض أن الأرض دائرية، وأن الشمس تبعد عنها مسافات شاسعة، استخدم فليسوف يونانى لاحق، إراتوسثينس الحساب الهندسى نفسه الذى استخدمه أناكزاجوراس لاستنتاج أن نصف قطر الأرض يجب أن يكون أربعة آلاف ميل تقريبًا. كلا الحسابين صحيح، والخطأ كان فى فرضية أناكزاجوراس.

وبذلك المعنى، فإن الفكرتين عن علاقة الشمس بالأرض التى قدمها الفيلسوفان اليونانيان تشكلان مجموعة جيدة من الفرضيات. إن البرهان الهندسى الذى حصلا عليه بمراقبة ارتفاع الشمس عند دلتا النيل وعند مدينة أسوان القديمة، يفيد «إما» أن الأرض مسطحة والشمس تبعد مسافة أربعة آلاف ميل فوقها، «أو» أن الشمس تبعد عن الأرض مسافات شاسعة وأن الأرض كرة نصف قطرها أربعة آلاف ميل. وكان الدليل المتاح فى ذلك الوقت يتفق مع أى الاحتمالين. وكان الأمر لا يحتاج إلا إلى المزيد من المشاهدات وعمليات الرصد والقياسات لاكتشاف أى الفرضيتين صحيح. وتفسير نفس المجموعة من البيانات تفسيرين مختلفين يؤدى إلى علم جيد. لكن الدرس المستهدف من هذه القصة هو أنه حتى المفكر الراديكالى(*) وبعيد النظر، الذى لا يخشى سطوة السلطات القائمة فى بحثه عن الحقيقة، لا يمكنه أن يتخلص من سطوة فكرة الأرض المسطحة. كان أناكزاجوراس متيقنًا من أن الأرض مسطحة بحيث لم يطرح الافتراض للبحث ـ وإلا لكان هو وليس إراتوستينس من يُعزى إليه أول قياس دقيق لنصف قطر الأرض. إن تاريخ العلم زاخر بمثل تلك الأمثلة التعيسة لنظريات حاولت البرهنة بمنطق كامل ودقة تامة؛ ولكنها انطلقت من قاعدة يقين غير مُفنَّد فى شىء اتضح بعد ذلك أنه غير صحيح إطلاقًا. إن المنهج العلمى الحقيقى يقضى بعدم اعتبار أى شىء حقيقة مُسلَّمًا بها؛ لكن بعض الافتراضات، مثل أن الأرض مسطحة فى زمن أناكزاجوراس، كانت متأصلة بعمق بحيث يتعذر استئصالها.

وإذا بدا أننى أفرطت فى علاج هذه النقطة، فسرعان ما سيتضح أسباب ذلك. إن قصة الكيفية التى طور بها علماء الفلك فهمهم للطريقة التى تحافظ بها الشمس على نيرانها الداخلية تزخر بأمثلة مشابهة لأمور تبدو واضحة ومسلَّمًا بها من قبَل جيل من العلماء، ثم يرفضها الجيل التالى لهم تمامًا. إن قوة النظرية تنبع من صحة الافتراضات التى بُنيت عليها، والمحك الحقيقى الوحيد لقوة أية نظرية هى قدرتها على التنبؤ الصحيح. وبناء على هذا المعيار، فقد تؤدى القصة، التى ينبغى أن أقولها، إلى اتجاهات غير متوقعة، ولكنها تتبع مسارًا محتومًا. فهى تُعنى أولاً بالجزء الداخلى للشمس ـ سر الشمس ـ وكيف حافظ على إمداد مستقر من الحرارة لآلاف المليارات من السنين، وهذا

(*) الراديكالى: نسبة إلى الراديكالية، وهى أية مجموعة من الأفكار تنادى بتغيير جوهرى من الناحيتين: الاجتماعية والسياسية بدلاً من الترويج للتيارات السائدة. وإطلاق هذه الصفة على أى فكر عملية تقديرية بحتة، وهكذا فإنه مصطلح فضفاض ذو إطار واسع. (المراجع).

الموضوع لم يصبح لغزًا بالنسبة للعلماء إلا فى القرن التاسع عشر فقط، عندما أدى اكتشاف قوانين الديناميكا الحرارية إلى الكشف عن أنه ما من شىء يمكن أن يظل ساخنًا للأبد، ولا حتى الشمس. وبلغة تاريخ الفلك، يُعد علم القرن التاسع عشر تاريخًا قديمًا. لكن قبل أن ننتقل إلى الموضوع الرئيس لقصتنا، ربما كان علىّ أن أوضِّح لماذا يبدو علماء الفلك فى الوقت الراهن واثقين جدًا من أن فكرتهم عن مدى بعد الشمس وحجمها ودرجة حرارتها، صحيحة على النقيض من أناكزاجوراس.

إحصائيات مهمة

يمكن قياس المسافات بين الأجسام الفلكية، بما فى ذلك القمر وأقرب الكواكب، باستخدام نفس التقنية الأساسية التى حاول أناكزاجوراس استخدامها لتحديد المسافة بين الأرض والشمس، وهى الاستعانة بعلم حساب المثلثات. وهى بعينها التقنية التى يستخدمها المسَّاحون ورسَّامو الخرائط هنا على كوكب الأرض. إذا أردنا معرفة المسافة إلى مَعلم من المعالم، مثل جبلٍ عالٍ، قد يصعب الانتقال إليه، يمكننا ببساطة قياس خط قاعدى دقيق، ونضع أدوات المساحة عند نهايتَى الخط ونضبط هذه الأجهزة نحو هذا المَعْلم. وبقياس الزاوية عند نهايتَى الخط القاعدى إلى المَعْلم، يمكننا حساب طول أضلاع المثلث الخيالى الممتد من الخط القاعدى بحيث يكون المعلم عند قمته. وكلما بعد الشىء، احتاجت عملية القياس بالطبع إلى دقة أكبر ومهارة أعلى. لكن الشمس بعيدة جدًا بحيث يصعب استخدام هذه التقنية. إن الفرق بين الزاوية المقاسة عند نهايتَى الخط القاعدى يكون صغيرًا جدًا، بحيث يصعب رصده، لكن تم استخدام هذه التقنية لإثبات أن المسافة بين القمر والأرض تساوى ستين ضعف نصف قطر الأرض.

لقد أعطت تقنيات هندسية مماثلة التقديرات الأوَّلية للمسافات إلى أقرب الكواكب للأرض، الزُّهَرة والمرِّيخ، وفى النصف الثانى من القرن العشرين، تطورت هذه القياسات باستخدام ارتداد الإشارات الرادارية من هذه الكواكب وحساب المسافات على أساس الوقت الذى تستغرقه الإشارة اللاسلكية؛ التى تنتقل بسّرعة الضوء، لاجتياز المسافة بين الأرض وهذه الكواكب والعودة مرة أخرى إلى الأرض. وقياس المسافة بين الأرض والزهرة هو القياس الرئيس، لأن الزهرة تدور حول الشمس داخل مدار دوران الأرض حول الشمس. وبما أن المدارات مائلة قليلاً، فإننا لا نرى كوكب الزهرة فى كل مرة يمر فيها أمام وجه الشمس. لكن يمكن استخدام الحالات النادرة التى يُشاهَد فيها كوكب

الزهرة من الأرض وهو يمر أمام وجه الشمس، للحصول على قياس للمسافة التى تفصل الأرض عن الشمس.

وتعتمد هذه التقنية على القيام بعمليات رصد متزامنة (أو التقاط صور فوتوغرافية متزامنة) من مرصدين يبعدان عن بعضهما البعض مسافة كبيرة؛ حيث يرصد كل مراقب البقعة السوداء التى تحدثها الزهرة عند مرورها عبر قرص الشمس. ولأن المرصدين يفحصان كوكب الزهرة المار عبر الشمس من زوايا مختلفة، فإنهما سيشاهدان صورة الكوكب على أجزاء مختلفة من الخلفية الشمسية، نتيجة لتأثير ظاهرة التغير الظاهرى Parallax effect فى موقع الجرم السماوى المنظور نتيجة اختلاف موقع الناظر (شكل ٣ ـ ١). إن هذا التأثير متضخم بشكل كبير هنا، لكن يمكنك أن ترى هذه الظاهرة بنفسك بأن تعرض إحدى أصابعك على امتداد ذراعك أمام خلفية مميزة، وعندئذ أغمض عينيك بالتناوب وراقب الإصبع وهى تتحرك عبر الخلفية. وبشكل خاص، ستكون رؤية لحظة عبور الزهرة لحافة قرص الشمس مختلفة عند رصدها من المرصدين المختلفين. وبمجرد أن تكون المسافة التى تفصل الأرض عن الزهرة معروفة، وكذلك المسافة بين المرصدين، يمكن مباشرة حساب المسافة بين أى من المرصدين والشمس.

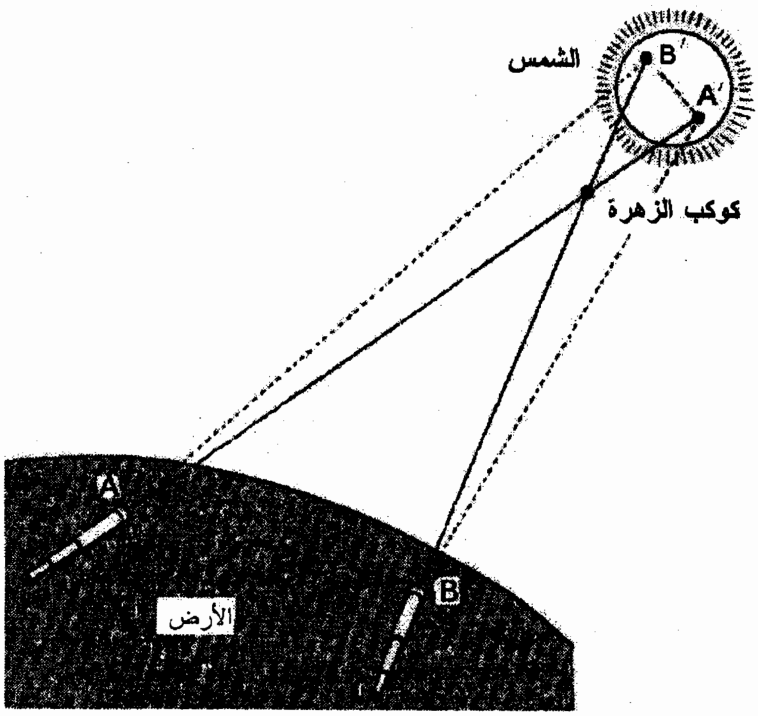
كل ذلك ومشاهدات أخرى تعطى النتيجة نفسها. إن المسافة المتوسطة بين الشمس والأرض هى ١٤٩،٥٩٧،٨٩٣ كيلومترًا («متوسطة» لأنها تختلف قليلاً أثناء السنة). وبشكل تقريبى، دقيق بما يكفى احتياجاتنا فى هذا الكتاب، يمكننا القول إن المسافة ١٥٠ مليون كيلومتر أو ٩٣ مليون ميل. ويعتبر علماء الفلك أن هذه المسافة «مقياس أساسى» للمسافة بحيث يسمونه الوحدة الفلكية، أو Astronomical Unit (AU)، وتُقاس بها المسافات إلى النجوم الأخرى.

كيف يمكن تقريب مثل هذه المسافة للأذهان؟ إن الضوء، الذى ينتقل بسرعة ٣٠٠ ألف كيلو متر فى الثانية، يستغرق ثمانى دقائق وعشرين ثانية لينتقل من الشمس إلى الأرض. لكن سرعة الضوء ذاتها كبيرة جدًا بحيث يصعب أن تكون مألوفة لنا. إن أسرع شىء يصادفه أى شخص عادى هو الطائرة، التى تطير بسرعة ٨٠٠ كيلومتر فى الساعة(*). ويمكنك، كراكب داخل هذه الطائرة، عبور المحيط الأطلنطى فى ساعات

(*) هناك الآن طائرات تخترق حاجز الصوت فى سرعة طيرانها أى تزيد سرعتها على ٧٤١ ميلاً/ ساعة أو ١٢٥٥كم/ ساعة تقريبًا. (المراجع).

قليلة أو الانتقال من نيويورك إلى سيدنى فى أكثر من يوم بقليل. لكن لو كان للطائرة أن تتابع طيرانها لمسافة تساوى المسافة بين الأرض والشمس، فإنها ستستمر فى الطيران لمدة ٢١ سنة بدون توقف(*).

إن الفضاء شاسع حقًا، وكذلك الشمس. وإذا كانت الشمس على هذه الدرجة من البعد، فمن البدهى أن تكون أكبر بكثير من أن يكون قطرها ٣٥ ميلاً كما افترض أناكزاجوراس عندما اعتقد أن الشمس تبعد أربعة آلاف ميل فوق الأرض. وإذا كان قرص الشمس الذى نراه يبعد مسافة ١٥٠ مليون كيلومتر، فإن الشمس لن يقل قطرها بحال عن مليون وثلاثمائة وتسعين ألف وخمسمائة كيلومتر، أى ١٠٩ أضعاف قطر الأرض. إننا نعلم الآن حجم الشمس وبُعدها عن الأرض، فما مقدار ما تحتويه من مادة؟



شكل (٣ ـ ١) المراقبون فى أماكن مختلفة على الأرض يرون كوكب الزهرة على أجزاء مختلفة من وجه الشمس، والفرق يساعدهم لحساب المسافة بين الأرض والشمس.

(*) وذلك بإسقاط حسابات الجاذبية ومتغيرات الضغط الجوى والحرارة والأكسچين ... إلخ من الحسبان. (المراجع)

يُعتبر الحجم أحد طرق قياس كمية المادة. والشمس أكبر من الأرض مليون مرة نظرًا لأن قطرها أكبر بما يزيد مائة مرة على قطر الأرض، بمعنى أن كرة بحجم الشمس يمكن أن تَسَع مليون كرة بحجم الأرض. وذلك لأن الحجم عبارة عن مكعب القطر، ومكعب المائة هو مليون، والمسافة من مركز الشمس إلى سطحها هى ضعف المسافة تقريبًا بين الأرض والقمر، وبينما نجد أن مائة أرض مصفوفة جنبًا إلى جنب ستتمدد عبر الشمس، فالمسافة بين الشمس والأرض توازى مائة شمس مصفوفة جنبًا إلى جنب. لكن كل ذلك لا يفيد فى حساب كَمِّ ما تحتويه الشمس من مادة.

إن كمية المادة التى تحتويها الشمس هى التى تحدد شدة الجذب التى تمارسها قوة الجاذبية التى تشد وتمسك بالكواكب فى مداراتها حولها. لقد اكتشف إسحق نيوتن قانون الجاذبية، الذى يستند على القاعدة التى تقول: تتوقف القوة التى تجذب جسمين معًا على كتلة الجسمين، ولحساب هذه القوة يتم قسمة حاصل ضرب الكتلتين على مربع المسافة بينهما، ثم ضَرْب الناتج فى ثابت قوة الجاذبية G. وفى القرن الثامن عشر، قام هنرى كافنديش (Henry Cawendish) بمجموعة من القياسات التى تحتاج إلى مثابرة وجهد، واستخدم فى ذلك كتلاً كبيرة وصغيرة، وحصل فى النهاية على قيمة الثابت G. وبمجرد معرفة قيمة هذا الثابت أصبح من السهل حساب كتلة الأرض، وذلك بقياس القوة التى تجذب بها الأرض أى جسم. وهو ما يُعرف بوزن هذا الجسم. والمسافة الموجودة فى المعادلة هى ببساطة المسافة إلى مركز الأرض، أى نصف قُطْر الأرض، الذى بين إراتوستينس لنا كيفية قياسه. وبالتالى تكون كتلة كوكب الأرض التى تم حسابها حوالى ٦ × ١٠^{٢٧} جرام. ومن ثَم تكون الكثافة المتوسطة للأرض ٥،٥ ضعف كثافة الماء.

ومع تحديد كتلة كوكب الأرض، عرف علماء الفلك مباشرة كتلة الشمس. فالأرض تدور حول الشمس دورة كاملة مرة كل عام، على مسافة ١٥٠ مليون كيلومتر، وبالتالى يعرف العلماء السرعة التى يجب أن تتحرك بها فى مدارها. والقوة المطلوبة لجعل الكوكب مستمرًا فى مداره معروفة من الفيزياء الأساسية. وسواء أكان الكوكب مستقرًا فى مكانه بواسطة خيط طويل مربوط فى مركز النظام الشمسى أم بواسطة قوة جاذبية الشمس، فلا بد أن تكون القوة واحدة. ومن كتلة الأرض المعروفة والمسافة بينها وبين الشمس، تكون الطريقة الوحيدة للحصول على قوة الجاذبية الصحيحة هى أن تكون

كتلة الشمس نفسها أصغر قليلاً من ٢ × ١٠^٣٣ جرام. ومعنى ذلك أن كتلة الشمس تساوى ثلث مليون ضعف كتلة الأرض وتشغل ما يعادل حجم مليون أرض. ولكن الكثافة المتوسطة للشمس ثلث الكثافة المتوسطة للأرض، فهى حوالى ١،٥ كثافة الماء. قد لا يبدو الرقم مثيرًا، لكن تذكر أنها كثافة «متوسطة». فبالرغم من أن الطبقات الخارجية للشمس تتكون ـ كما سنرى ـ من طبقات غير كثيفة من الغاز، فإننا كلما توغلنا بعمق فى قلب الشمس تتعزز الكثافة والضغط والحرارة بشكل مثير. لكننا نحتاج أولاً إلى تصور كمية الحرارة التى تشعها الشمس على سطحها.

لن أتناول كل التفاصيل التاريخية هنا، لأن هناك مثالاً بسيطًا وجميلاً لقوة إشعاع الشمس قدمه عالم الفلك هربرت فريدمان (Herbert Friedman) فى كتابه «الشمس والأرض». حيث يشير إلى أن سى. أيه. يانج (C.A.Yamg)، من جامعة برينستون، اعتاد أن يبدأ الحديث مع طلابه بالملاحظة التي ذكرها وليم هرشل (William Herschel) فى نهاية القرن الثامن عشر، وهى أن بإمكان حرارة شمس الصيف وقت الظهيرة ان تصهر طبقة من الجليد سمكها بوصة واحدة فى مدة ساعتين واثنتى عشرة دقيقة.

لا يبدو ذلك مثيرًا حقيقة إلا عندما تدرك أن الشمس تصب أشعتها بشكل متساو فى جميع الاتجاهات. وبالتالى إذا كانت هناك طاقة تكفى لصهر قطعة جليد سمكها بوصة بهذه السرعة عند النقطة التى تستقبل فيها الأرض أثناء دورانها ضوء الشمس، فلا بد أيضًا أن تعبر كمية الطاقة نفسها كل سنتيمتر مربع من الفضاء عند المسافة نفسها من الشمس. بمعنى آخر، هناك كمية كافية من الطاقة تتصب من الشمس لصهر غلاف كامل من الجليد سُمكه بوصة واحدة وقطره ٣٠٠ مليون كيلومتر خلال ساعتين واثنتى عشرة دقيقة. واعتاد يانج أن يطلب من طلابه أن يتخيلوا انكماش قطر هذا الغلاف الجليدى، مقتربًا من الشمس بحيث تقل مساحته تدريجيًا، ويزداد سمكه فى الوقت نفسه بحيث يتضمن دائمًا كمية الجليد الإجمالية نفسها. وعندما يلمس السطح الداخلى لهذا الغلاف الجليدى الخيالى سطح الشمس يكون سمكه أكثر من ميل، ولكن سيظل ينصهر فى الفترة الزمنية نفسها تمامًا.

إن درجة حرارة سطح الشمس، الكافية للقيام بهذا الإنجاز هى ٥٧٧٠ كلفن(*). يمكننا الآن قياس كمية الحرارة التى تصل لكل سنتيمتر مربع من سطح كوكب الأرض

(*) الكلفن وحدة قياس درجات الحرارة المطلقة حيث يساوى الصفر المطلق ـ ٢٧٣م.

(أو التى تدفئ فعلاً أجهزة الرصد على متن الأقمار الصناعية فى الفضاء الخارجى)، مع أخذ المسافة إلى الشمس فى الاعتبار. هناك أيضًا طريقة أخرى لقياس درجة حرارة جسم ساخن، وذلك من خلال لونه، فكما أن قطعة حديد شديدة الاتقاد حتى الابيضاض تكون أكثر سخونةً من قطعة حديد متوهجة حتى الاحمرار، فالنجم الأزرق أو الأبيض أكثر سخونةً من النجم الأصفر أو البرتقالى. إن العلاقة بين درجة الحرارة واللون تخضع لقانون دقيق، تمت دراسته تفصيلاً فى تجارب معملية، بحيث يمكن تحديد هذه العلاقة كميًا. والرقم الذى انتهينا إليه هو نفسه ـ درجة حرارة نجم مصفر مثل شمسنا تكون حوالى ستة آلاف كلفن.

ولا يمثل ذلك حقًا رقمًا لافتًا للنظر بشكل خاص، إذ إن الفتيل المتوهج للمصباح الكهربائى يعمل عند حوالى ألفَىْ كِلفن، ورغم أن «سطح» الشمس أسخن قليلاً من الحديد المتوهج، فإن درجة حرارته يسهل إدراكها حتى بالنسبة لأناكزاجوراس. لقد ظهرت المشكلة فى القرن التاسع عشر، عندما بدأ علماء الچيولوچيا والبيولوچيا المؤمنون بنظرية التطور تقدير العمر الأقصى للأرض، وأشاروا إلى أن الشمس لا بد قد استمرت تشع هذا الضياء لعدة مئات وربما آلاف ملايين السنين.

وطرح ذلك بالنسبة للعلم مشكلة كبرى، لأن علماء الفيزياء بدءوا فى الوقت نفسه فى النظر فى قوانين الديناميكا الحرارية وبقاء الطاقة التى تضع حدودًا شديدة الصرامة بالنسبة للفترة الزمنية التى تستطيع فيها الشمس الحفاظ على إنتاجها من الطاقة عند المستوى الحالى. كانت كل القوانين الفيزيائية المعروفة فى القرن التاسع عشر، غير كافية لتفسير تمكن الشمس من الحفاظ على حرارتها طوال تلك الفترة الطويلة التى افترضها علماء الچيولوچيا والبيولوچيا. هل كان هؤلاء العلماء على خطأ؟ أم كان فهم الفيزياء هو الناقص؟ وكان أحد أعظم علماء ذلك الوقت مقتنعًا بأنه إذا كان هناك مَنْ يتعين عليه أن يتراجع ويعلن خطأه، فلن تكون قوانين الفيزياء بالطبع، وقاد هجومًا شرسًا ضد أى شخص يتجرأ على اقتراح نقيض ذلك. غير أنه كان لا مفر من أخذ الأدلة الچيولوچية بجدية، لما لها من وزن.

الجماعة الفرنسية

فى القرن الثامن عشر، كان القول بأن الأرض خُلقت منذ حوالى ستة آلاف عام أمرًا مقبولاً على نطاق عريض. ففى عام ١٦٥٤، أدخل چون لايتفوت (John Lightfoot)

تحسينات على عملية حسابية شهيرة سبق أن قام بها يوشر (Ussher) رئيس الأساقفة فى بداية القرن السابع عشر. وقد حددت هذه التحسينات أن لحظة الخلق حدثت فى الساعة التاسعة صباحًا بتوقيت ما بين النهرين يوم ٢٦ من أكتوبر، عام ٤٠٠٤ قبل الميلاد حسب تقويم چوليان. ولم يعتمد هذا التقدير على أية قاعدة علمية فى مجال الحساب أو الرصد والمشاهدة، وإنما تم التوصل إليه بالعد التنازلى للأجيال المشار إليها فى التوراة، ابتداء من المسيح عودة إلى آدم. الآن، يقبل رجال الكهنوت ألا تؤخذ التوراة حرفيًا لهذه الدرجة، وأن الأرض والشمس والكون ككل وُجِدَ منذ حقبة كبيرة من الوقت أكبر مما كان أسلافنا يمكنهم تخيلها. إن أول محاولة لمد المقياس الزمنى، وأول تقدير علمى لعمر الأرض، دفع هذا العمر ليصل إلى ٧٥ ألف عام، وهو أقل بكثير عن الرقم المحسوب الآن. غير أن هذا التقدير زاد عمر الأرض عشرة أضعاف، وتحدى العقيدة الدينية الراسخة، كما فعل أناكزاجوراس من قبل عندما رفض تلك العقيدة فى تناوله لقضية طبيعة الشمس. لكن چورج ـ لويس لكليرك (Georges - Louis Leclerc)، كُونتٌ دى بوفون (de Buffon)، الذى أجرى هذا الحساب، لم يلق مصير أناكزاجوراس، واستغرقت البذرة التى زرعها وقتًا أقل لتؤتى ثمارها.

وُلد لكليرك أو كونت دى بوفون فى عام ١٧٠٧ فى مونتبارد، ببورجندى، لأحد رجال القضاء. وفى منتصف العشرينيات من عمره، ورث لقبه ومعه أملاك. وحصل على تعليم جيد، حيث درس فى بادئ الأمر القانون ثم الرياضيات والعلوم. وفى أنجرز انقطع عن دراسته الرسمية عندما اضطر إلى مغادرة البلاد إثر مبارزة، وانتقل فى بداية الثلاثينيات من القرن الثامن عشر إلى إيطاليا ثم إنجلترا. وعندما تُوفيت والدته وآلت إليه التركة عاد إلى وطنه واستقر هناك. وأصبح الكونت دى بوفون، واشتهر بأنه العالم النبيل ـ كان ثريًا بما يكفى للبحث فيما يثير اهتمامه من مجالات، ولكنه كان جادًا أيضًا وقادرًا على تقديم إسهامات قيِّمة للمعرفة. بعد أن أجرى بوفون بعض الأبحاث المهمة عن قوة خشب الأشجار ـ وكانت مادة لها قيمة عسكرية كبيرة فى تلك الأيام ـ استخدم وزير البحرية نفوذه، لما سُرَّ بهذه الأبحاث، لكى يصبح بوفون، فى عام ١٧٣٩، مسئولاً عن الحديقة الملكية فى باريس. وتولى إدارة الحدائق النباتية، والمتحف المرفق بها، لفترة نصف قرن تقريبًا، ضاعف فيها المساحة المزروعة وحصل على العديد من الأنواع الجديدة.

إن إنتاج بوفون العظيم هو كتاب «التاريخ الطبيعى»، الذى بدأ ككتالوج لمتحف الملك، ثم تطور إلى محاولة لوصف كل العالم الطبيعى. وكان مخططًا لهذا الكتاب أن يكون فى خمسين مجلدًا، لكن العمر لم يسعفه لتحقيق ذلك حيث تُوفى فى عام ١٧٨٨ بعد أن أتم ٣٦ مجلدًا منها فقط. غير أن ما أنجزه ترك بصمة على عالم العلم فى القرن الثامن عشر.

وأغلب أعمال بوفون ليس له صلة مباشرة بلغز طبيعة الشمس، لكنه انشغل ضمن اهتماماته الكثيرة بتحديد عمر الأرض. لم يكن بوفون مقتنعًا بأن حرارة الشمس تكفى للمحافظة على دفء الأرض، وافترض وجود حرارة تنبعث من داخل الأرض فتوفر الظروف المناسبة للحياة. ولما لم يكن يعرف طريقة لتوليد الحرارة داخل الأرض، فقد افترض أن الأرض نشأت عن كرة منصهرة من الصخور، وأنها تبرد بالتدريج منذ ذلك الوقت. وأن هذه الأرض البدائية، المنصهرة، انفصلت عن الشمس بفعل اصطدامها مع نيزك مارّ، لكن كم من الوقت استغرقت عملية تبريد الأرض لتصل إلى حالتها الحالية؟

كان نيوتن قد أشار فى كتابه «المبادئ الأساسية» (Principia)، إلى أن كرة من الحديد المتوهج بحجم الأرض قد تستغرق خمسين ألف عام حتى تبرد. وقد قام بوفون فعلاً بتجارب على كُرات من الحديد ومواد أخرى بأحجام مختلفة، ورصد الزمن الذى تستغرقه كل منها لكى تبرد من درجة التوهج. ومسلحًا بهذه المعلومات، وبالمعرفة الدقيقة التى كانت لدى العلماء عن حجم الأرض، أدخل بوفون تحسينات على حسابات نيوتن، مفترضًا أنه إذا كانت الأرض قد ولدت فى حالة منصهرة فإنها استغرقت ٣٦ ألف عام حتى تبرد إلى درجة تسمح بظهور الحياة عليها، واستغرقت ٣٩ ألف عام أخرى (٧٥ ألف عام إجمالاً) حتى تبرد إلى درجة حرارتها الحالية.

وهاجم رجال الكنيسة فى ذلك الوقت بالطبع هذه الزيادة الكبيرة فى المقياس الزمنى لتاريخ الأرض. لكن، بوفون، على الأقل، لم يتم نفيه، وظل تأثير أفكاره ممتدًا حتى بعد وفاته وعبر القرن التاسع عشر، بالرغم من تناقضها التام مع المعتقدات الدينية.

كان الخط المباشر لتأثير بوفون على الأجيال التى تلته من العلماء من خلال جان فورييه (Jean Fourrier)، الذى ارتبط اسمه بتطويره لأداة رياضية تُعرف باسم سلسلة فورييه، والتى تطورت بعد ذلك لتصبح تحليل فورييه (أو التحليل التوافقى). فى الواقع،

كان فورييه، الذى ولد عام ١٧٦٨ فى أوكزير، عالم فيزياء فى البداية، وطور رياضياته كوسيلة لغاية، لكى يتمكن من أن يحلل بدقة قضايا فيزيائية مهمة(*)، حيث كان مفتونًا، بشكل خاص، بقضية توفير وسائل دقيقة لحساب الطريقة التى تنتقل بها الحرارة خلال الأجسام. إن الاهتمام الذى أَوْلاهُ بوفون لعمر الأرض قاد فورييه فى دراسته للتوصيل الحرارى، والرياضيات التى يحتاجها لوصف العملية. كان بوفون قد توقف عند قياس المعدل الذى تبرد به الأجسام الساخنة، وحاول أن يقدّر استقرائيًا هذا المعدل بالنسبة لجسم فى حجم الأرض. ومن جهة أخرى، حاول فورييه تطوير القوانين ـ المعادلات الرياضية ـ لوصف المعدل الذى يمكن أن تتسرب به الحرارة من جسم ما، واستخدم هذه المعادلات لحساب الوقت الذى يمكن أن تكون الأرض قد استغرقته حتى تبرد. فى ظل هذا التصور، فإن الأرض وإن كانت أبرد فى الخارج فإنها تظل عند درجة انصهار الصخور فى مركزها، حتى فى عصرنا (وهو ما يعنى درجة حرارة أعلى من ستة آلاف كلفن، أى أعلى من درجة الحرارة عند «سطح» الشمس حاليًا). وطبقًا لهذه التقديرات، فإن هناك انخفاضًا مُطّردًا فى درجة الحرارة ـ ممال(**) حرارى ـ من الداخل إلى الخارج، وتدفق حرارى مستمر نحو الخارج. ولأن طبقات المادة الأقل حرارة التى تحيط بالقلب الساخن تعمل كطبقة عازلة وتحتفظ بالحرارة فى الداخل، فإن الأرض تستغرق وقتًا طويلاً لكى تبرد، وهو ما أدركه بوفون من قبل. وفى عام ١٨٢٠، كتب فورييه معادلة لعمر الأرض تعتمد على هذه الحجج، لكنه لم يسجل الرقم الناتج عن هذه المعادلة. ولعله اعتبر القيمة التى استنتجها لعمر الأرض كبيرة جدًا بحيث يصعب أخذها على محمل الجد ـ فبدلاً من عمر الأرض الذى توصل إليه بوفون، وهو ٧٥ «ألف» عام، أفضت معادلات فورييه إلى أن عمر الأرض مائة «مليون» عام.

ولم يُحْدث هذا الرقم ضجة مباشرة، لأنه ببساطة لم يُنشر. ومات فورييه عام ١٨٣٠، فكان لا بد من مرور ثلاثين عامًا أخرى قبل أن يتم إجراء الحسابات نفسها

(*) كان فورييه أصلاً عالم فيزياء، ومن النشطاء سياسيًا أيضًا فى زمن الثورة الفرنسية. وقد صاحب نابليون فى حملته إلى مصر، وكان مسئولاً عن إصدار كتاب «وصف مصر» الذى يقع فى ٢١ مجلدًا وكان أشهر نتاج لهذه الحملة. ولقد أسس هذا الكتاب «علم المصريات» كفرع للدراسة. وعندما عاد إلى فرنسا عُين حاكمًا لإقليم الرون، ومنحه نابليون لقب بارون ثم كونت، لكن ذلك لم يمنعه من الاستقالة من مناصبه فى أواخر عهد نابليون احتجاجًا على تجاوزات النظام. وكان يمارس أبحاثه العلمية كهواية، فى وقت فراغه، بما فى ذلك أول إشارة علمية لما نعرفه حاليًا بتأثير الصوبة.

(**) نسبة الزيادة أو النقص فى الحرارة، أو المنحنى الذى يمثلها.

والترويج لها على نطاق عريض باعتبارها توضح العمر الحقيقى للأرض. لكن سرعان ما أوضح وليم طومسون(*)، المتحمس لهذا المقياس الزمنى، أن مائة مليون عام هى مقياس زمنى «قصير» لدرجة أنها تسبب إحراجًا لعلماء الچيولوچيا والعلماء المؤمنين بنظرية التطور.

المقياس الزمنى الچيولوچى

أحد أهم المعتقدات الأساسية لعلم الچيولوچيا الحديث فكرة أن العمليات التى نراها تتم حاليًا على كوكب الأرض - مثل عوامل التعرية والنشاط البركانى والزلازل.. إلخ - تكفى وحدها لتفسير كيف وصل العالم إلى حالته الراهنة، بشريطة توافر وقت كاف لقوى الرياح والطقس والقوى الباقية، للقيام بعملها. إن هذا المفهوم يبدو لنا طبيعيًا كما بدا مفهوم الأرض المسطحة طبيعيًا لأناكزاجوراس، وقد يمر بدون تعليق كجزء من مقدمة تمهيدية لعلم الچيوفيزياء. لكن هذه الفكرة «المسلَّم بها» لم تظهر على السطح إلا فى نهاية القرن الثامن عشر، عندما أبرزها العالم الاسكتلندى چيمس هيوتن (James Hutton)(**)، أحد معاصرى بوفون، وأصبحت حقيقة راسخة من حقائق الحياة العلمية فى القرن التاسع عشر فقط، وذلك بعد جدل عنيف بين فريق من العلماء يؤمن بالنظرية القائلة بأن التغيرات الچيولوچية فى تاريخ الأرض سببتها عمليات لاتزال نشطة حتى الآن وليس بسبب كوارث طبيعية، وإن الأرض كانت دائمًا مثلما هى الآن تقريبًا - وبين فريق آخر من العلماء يرى أن التغيرات الچيولوچية الكبرى للأرض والسمات المثيرة مثل سلاسل الجبال وأحواض المحيطات لا يمكن لها أن تتكون إلا أثناء حقب من الثوران والاضطراب العنيف والمفاجئ، عندما كانت الأرض فى قبضة قوى مدمرة غامضة وربما خارقة للطبيعة، وليس طبقًا لمفهوم التغير التدريجى المنتظم المعترف به حاليًا.

وُلد هيوتن عام ١٧٢٦، وكان والده تاجرًا، وكانت أسرته تعده ليصبح محاميًا، لكنه تحول بدلاً من ذلك إلى دراسة الكيمياء. وابتكر مع صديقه چون دافى طريقة لإنتاج كلوريد الأمونيوم، وهى مادة كيميائية ذات قيمة كبيرة فى الصناعة، فجنى من هذا

(*) أصبح بعد ذلك اللورد كلفن.

(**) چيمس هيوتن James Hutton (١٧٢٦ - ١٧٦٧) چيولوچى بريطانى ولد فى إدنبره. وأهم إنجازاته تأليفه كتاب «نظرية الأرض» A Theory Of The Earth (١٧٩٥)، ويُعد هذا الكتاب أساسًا لعلم الچيولوچيا الحديث.

الابتكار قدرًا كافيًا من المال، وبالإضافة إلى ميراث متواضع استطاع أن يقدم نفسه كمزارع وجيه فى برويكشير: ونجح فى الزراعة أيضًا، وأثناء ذلك اهتم بتأثير المياه الجارية على الصخور والتربة، وقام بعدة رحلات إلى أوروبا لدراسة تقنيات الزراعة لكنه اغتنم كل فرصة ممكنة لمعرفة المزيد عن الصخور والمعادن. وفى عام ١٧٦٨، بعد أن أصبح مستقلاً ماديًا، عاد إلى إدنبره، وأمضى بقية عمره فى البحث العلمى، ولاسيما الچيولوچيا.

وظهرت أفكار هيوتن الداعية لمفهوم التغيير التدريجى المنتظم لأول مرة مطبوعة فى بحث علمى نُشر عام ١٧٨٨، ثم بعد ذلك فى كتاب «نظرية الأرض» (Theory of the Earth) عام ١٧٩٥، قبل وفاته بوقت قصير. وبالرغم من أن أفكار هيوتن أثارت رد فعل قوى من جانب بعض النقاد فى التسعينيات من القرن الثامن عشر، إلا أن أسلوب هيوتن الصعب فى الكتابة حال دون وصول أفكاره للجمهور العريض حتى عام ١٨٠٢، عندما نشر صديقه چون بلاى فير نسخة من الكتاب، بعد إعادة تحريره، تحت عنوان: «توضيح لنظرية هيوتن» (Illustrration of the Huttonian Theory).وعندئذ فقط بدأ التعامل مع الفكرة بجدية، وانقسم علماء الچيولوچيا إلى معسكرين، ما بين مؤيد ومعارض.

لقد اعترف العلماء بالنظرية القائلة بالتغيير التدريجى لكوكب الأرض بحيث لم تعد هناك حاجة لمزيد من الحديث عن هذه النقطة، لكن تجدر الإشارة إلى أن هيوتن كان أول من أشار مثلاً إلى أنه يمكن تفسير حرارة الأرض، بدون تدخل أية قوة خارقة، كما أوضح أيضًا كيف يمكن أن تنصهر الصخور الرسوبية، التى رسبتها المياه، لتصبح جرانيت وحجر صوان. وكان أول من قال بأن الحرارة فى قلب الأرض هى المسئولة عن دفع سلاسل الجبال إلى أعلى، والتواء الطبقات الچيولوچية، لكن ذلك استغرق فى حدوثه وقتًا طويلاً، وهو ما أدركه هيوتن.

ربما كان أسلوبه فى الكتابة صعب الفهم، لكن هيوتن أثبت أن قوى التعرية تعمل ببطء شديد حتى فى عصرنا، واستشهد على ذلك بمثال واضح تمامًا وهو أن الطرق الرومانية لا تزال مرئية حتى بعد مرور أكثر من ألفَىْ عام على شقها. ومن ثَم، فإن هذه العمليات البطيئة التى تعمل على تشكيل ونحت وجه الأرض لتصبح فى شكلها الحديث تتطلب وقتًا أطول بكثير من الزمن الذى حددته التوراة وهو ستة آلاف عام. وكتب

هيوتن عن عمر الأرض: «لا يوجد أى أثر لبداية . ولا أى احتمال أو إمكانية لنهاية»، فهو يعتبر مسألة عمر الأرض تتجاوز نطاق الفهم.

وفى القرن التاسع عشر، طور عالم اسكتلندى آخر، هو تشارلز ليل (Charles Lyell)، فكرة هيوتن الرائدة. وقد ولد ليل فى عام ١٧٩٧؛ فى العام نفسه الذى تُوفِّى فيه هيوتن. وكانت أسرة ليل ترغب أيضًا فى توجيهه إلى مهنة المحاماة، مثل أسرة هيوتن، وفى عام ١٨٢٥، أصبح محاميًا بالفعل لكن اهتمامه بالعلم، وخاصة الچيولوچيا، كان كفيلاً بصرفه عن المحاماة تمامًا كهيوتن. وفى أواخر العشرينيات من القرن التاسع عشر، استطاع ليل القيام برحلات مكثفه عبر القارة الأوروبية . وكان أبوه ثريًا بما يتيح له ذلك . وفى كل مكان ذهب تشارلز إليه وجد دليلاً على الكيفية التى تمكنت بها القوى الطبيعية من تشكيل معالم الأرض. ووجد فى المنطقة التى تحيط بجبل أتنا، بشكل خاص، دليلاً مؤكدًا على ما كان يؤمن به من أفكار. وظهرت ثمار رحلات ليل فى ثلاثة مجلدات، هى: «مبادئ الچيولوچيا». وقد صدر المجلد الأول فى عام ١٨٣٠، والمجلد الثانى فى عام ١٨٣١ والثالث فى عام ١٨٣٣ . ويصف العنوان الفرعى للمجلد الأول هذا العمل بعبارة وجيزة: «هو محاولة لتفسير التغيرات السابقة التى حدثت لسطح الأرض بالرجوع إلى أسباب لازالت تعمل حتى الآن».

وقد أثارت كتب ليل ضجة مباشرة، وأحدثت تأثيرًا كبيرًا على شاب متخصص فى مجال التاريخ الطبيعى هو شارلز داروين (Charles Darwin)، الذى كان قد بدأ لتوه رحلة على متن السفينة الملكية «بيجل». وأخذ داروين المجلد الأول معه، ووصله المجلد الثانى أثناء الرحلة، فى حين كان المجلد الثالث فى انتظاره عند عودته إلى الوطن عام ١٨٣٦ . ولم يكف داروين أبدًا عن الاعتراف بفضل ليل عليه، فهو الذى بين له أن الأرض قديمة جد Whبالفعل، وأن كل ما كان مطلوبًا لتفسير مظهرها الحالى هو مجموعة القوى نفسها التى نراها تعمل حاليًا . وطبق ليل هذه النظرية على الصخور فى حين طبقها داروين، بنجاح مماثل، على الكائنات الحية. إن التطور بالانتخاب الطبيعى يتطلب، قبل أى شىء آخر، مقياسًا زمنيًا طويلاً ليؤدى عمله، وكان ليل هو الذى أهدى داروين هذا المقياس الزمنى.

وارتبط العالمان بعد ذلك بصداقة حميمة، بالرغم من أن ليل كان بطيئًا فى الاقتناع بفكرة النشوء والارتقاء. لكن بعد أن صدر كتاب «أصل الأنواع» (Origin of Species)

فى عام ١٨٥٩، بدأ ليل يقتنع تدريجيًا بطرح داروين وأدلته، ومنحه تأييده مكتوبًا فى طبعة كبرى جديدة لكتابه «مبادئ الچيولوچيا»، صدرت عام ١٨٦٥. وكان ذلك يعنى الكثير بالنسبة لداروين، لأن ليل كان فى ذلك الوقت يحمل لقب فارس وتربطه علاقات صداقة مع الأسرة المالكة وكبار السياسيين، فضلاً عن حصوله على العديد من الأوسمة العلمية، كما كان معروفًا بشكل واسع للجمهور العريض. ولذلك كان وقوفه إلى جانب داروين له وزنه حيث كانت المعارضة شرسة لأفكار داروين، ولقد نجح بذلك فى إقناع العديد من الناس أن هناك بالضرورة شيئًا، فى نهاية الأمر، فى قضية النشوء تلك.

وكان داروين سعيدًا بموقف صديقه وعلق قائلاً: «أعتقد أن ما قام به ليل عمل بطولى، نظرًا لسنِّه، وآرائه السابقة، ومكانته فى المجتمع».

ومع ذلك، فلقد تعرض كل من داروين وليل لهجوم عنيف، ليس من قبَل الأصوليين الدينيين ولكن من علماء الفيزياء الذين كانوا يقولون إنه لا توجد عمليات طبيعية معروفة يمكنها توفير الظروف المناسبة للحياة على الأرض لفترة طويلة تكفى لقيام العمليات الچيولوچية بتشكيل الكوكب، أو حدوث التطور بإنتاج تنوع الحياة الذى نراه الآن، ولم يكن هناك رد واضح وجلى على هذا النقد، الذى كان يتعين أخذه مأخذ الجد. وبدا الأمر وكأن علمَى الأحياء والچيولوچيا يثبتان للعلماء معًا أن الأرض والشمس أقدم بكثير عما هو ممكن فيزيائيًا.

الديناميكا الحرارية للشمس

أصبح بحث فورييه فى الرياضيات عن كيفية تدفق الحرارة من مكان إلى آخر أحد أكبر الإنجازات العلمية فى القرن التاسع عشر، وهو علم الديناميكا الحرارية. لقد أدى التحقق من أن الطاقة الحرارية تكافئ تمامًا الطاقة الميكانيكية (الشُغْل)، وأن الحرارة لا تتدفق إلا فى اتجاه واحد، من الأجسام الأعلى حرارة إلى الأجسام الأدنى حرارة، وليس بالعكس (القانون الثانى للديناميكا الحرارية)، وأن كمية القصور الحرارى (الإنتروبيا)(*) فى الكون فى ازدياد مستمر (وتم صياغة ذلك فى شكل رياضى بالغ الدقة)، أدى كل ذلك إلى إحداث ثورة فى العلم، ومكن علماء الفيزياء من دراسة العديد من الظواهر وتحديدها كميًا، وهى ظواهر كان من الصعب تفسيرها قبل ذلك بشكل علمى دقيق،

(*) عامل رياضى يُعتبر مقياسًا للطاقة غير المستفادة فى نظام ديناميكى حرارى.

وكان عمر الشمس والأرض فى ذلك الوقت الظاهرة الطبيعية الأهم التى كان ينبغى على الديناميكا الحرارية بحثها(*).

فى العقود التى تلت وفاة فورييه، بدأت بعض المفاهيم الجديدة تنتشر ببطء، مثل إمكانية تقدير مصدر الطاقة والحرارة كميًا، وإن الطاقة مصدر محدود ولو كانت طاقة الشمس. وبدأت قلة من العلماء تشعر بالقلق على الطاقة التى تسرف الشمس فى إهدارها فى الفضاء، وتتساءل عن مصدر هذه الطاقة وإلى متى سيستمر هذا المخزون. وفى تلك الأيام، كان تفكير أى شخص فى هذه المشكلات ينبع من مفهوم الطاقة الناتجة عن احتراق الفحم، وهو المصدر الرئيسى للطاقة التى كانت تدير عجلة الثورة الصناعية. أما حاليًا، فيمكننا تحديث هذه الحسابات باتخاذ البديل الحديث للفحم معيارًا، أى الجازولين. ولو كانت الشمس تتكون بالكامل من الجازولين، فإن احتراقه بأفضل كفاءة ممكنة لا يمكِّنه من المحافظة على درجة حرارتها الحالية إلا لمدة عشرات الآلاف من السنوات فقط. وينطبق الشىء ذاته على أية صورة من صور الاحتراق الكيميائى، حيث تتحرر الطاقة عندما تترابط الذرات معًا فى ترتيبات جزيئية أكثر كفاءة، من منظور الطاقة ، عن الترتيبات التى كانت عليها قبل الاحتراق. ولا يستطيع أى شكل من أشكال الطاقة الكيمائية أن يحتفظ بسخونة الشمس أكثر من عشرات الآلاف من السنوات فقط.

إن الرسالة تستغرق بعض الوقت لكى تُفهم فهمًا جيدًا، ولكى يُقدر علماء الفيزياء أهميتها. وكان أول من عالج القضية، كل على حدة، عالمان مغموران إلى حد كبير فى ذلك الوقت، وبالرغم من حصولهما على بعض التقدير اللاحق على أبحاثهما، إلا أن معاملتهما على هذا النحو تجعل من المحتمل تمامًا وجود بطل علمى فكَّر طبقًا للخط نفسه قبل كل منهما، لكن تم نسيانه تمامًا. وعلى أية حال، فإن أول شخص يعتبره الجميع الآن أنه عبر عن قانون بقاء الطاقة الذى ينص على أن الطاقة لا تَفْنَى ولا تُخلق من العدم، ولكنها تتحول من صورة إلى أخرى، هو چوليوس ماير (Julius Mayer)، العالم الفيزيائى الألمانى الذى عاش فى هايلبرون.

ولد ماير عام ١٨١٤ فى هايلبرون، ودرس الطب فى جامعة تيبنجن وفى كل من فيينا وباريس. وفى عام ١٨٤٠، عمل طبيبًا على مركب مبحرة إلى جزر الهند الشرقية.

(*) للتعرف على المزيد من النطاق العريض الذى تغطيه الديناميكا الحرارية راجع كتاب «The Omega Point» تأليف چون جريبين وكتاب «The Second Law» تأليف بيتر أتكنز.

وكان فصد المرضى فى تلك الأيام روتينًا طبيًا مألوفًا. وعندما قام ماير بفصد أفراد طاقم المركب أثناء إقامتهم فى المناطق الاستوائية، أثار لون دم أوردتهم دهشته، إذ كان أحمر زاهيًا. إن ماير القادم من أوروبا قد اعتاد على مظهر مختلف للدم الشريانى والوريدى، لأن الدم الشريانى يحمل كمية كبيرة من الأكسجين من الرئتين إلى العضلات وأنسجة الجسم الأخرى فإن لونه يكون أحمر زاهيًا، أما دم الأوردة العائد إلى الرئتين فيكون لونه أغمق بكثير، أى أحمر مائلاً إلى الأرجوانى، نظرًا لانخفاض نسبة الأكسجين به. ولذلك عندما فتح ماير وريد أحد البحارة فى جاوة، اعتقد فى بادئ الأمر أنه قطع شريانًا بالخطأ، لأن الدم كان شديد الاحمرار. ولما وجد أنه لم يخطئ، وأن الدم الوريدى لكل البحارة له نفس درجة الاحمرار، أدرك أن ذلك يعنى أن الدم الوريدى فى المناخ الحار يحمل قدرًا أكبر من الأكسجين عنه فى المناخ الأبرد؛ نظرًا لأن الجسم فى المناخ الأكثر دفئًا يحتاج إلى كمية أقل من الأكسجين للحفاظ على درجة حرارته. وكان ماير على علم بالفكرة الرائدة التى طرحها أنطوان لافوازييه فى القرن الثامن عشر والتى تفيد أن الحيوانات ذوات درجة الحرارة الثابتة تحتفظ بدرجة حرارة أجسامها عن طريق صورة من صور الاحتراق البطىء الذى يحدث داخل الجسم، حيث يتحد الطعام بالأكسجين. بنبوءة حدسية كبيرة توصل ماير إلى الخلاصة التالية: أن الشغل (مثل الجهد العضلى) والحرارة (بما فى ذلك دفء الجسم) والأشكال الأخرى من الطاقة (مثل الطاقة الكيميائية التى تنطلق من أكسدة الطعام، أو من احتراق الفحم) كلها صور قابلة للتبادل فيما بينها، وأن الشغل أو الطاقة لا تُخلق قط ولكنها تتحول فقط من صورة إلى صورة أخرى من الطاقة.

وعاد ماير إلى ألمانيا عام ١٨٤١ واستقر فى هاميلبرون كممارس عام. وكان ناجحًا فى عمله كطبيب لكنه ظل مهتمًا بتلك الأفكار الجديدة عن طبيعة الحرارة، كما علّم نفسه الفيزياء وأجرى بعض التجارب، ونشر أول بحث علمى له فى موضوعات مهمة مثل طريقة تحويل الطاقة الميكانيكية إلى حرارة عند ضغط الهواء فى مضخة. وكان يجب أن يصبح البحث الذى قدمه ماير هو حجر الزاوية فى مناقشة مصدر طاقة الشمس، لكنه قوبل بالتجاهل التام تقريبًا آنذاك. وعندما اكتشف آخرون نفس الأفكار، كل على حدة، وبدأت تحظى بقدر كبير من الرعاية والتقدير، أصيب ماير بالاكتئاب حتى إنه حاول الانتحار عام ١٨٥٠، وأمضى عدة سنوات فى مصحات عقلية. غير أن جهده نال اعترافًا بعد ذلك، وتحسنت حالته الصحية ومُنح عدة أوسمة قبل وفاته عام ١٨٧٨.

وواجه الرائد الآخر للديناميكا الحرارية للشمس، وهو چون وترستون (John Waterston)، مصيرًا أسوأ من مصير ماير. وقد ولد چون وترستون عام ١٨١١ فى إدنبره، وكان يدرس فى جامعة إدنبره إلى جانب عمله كمهندس مدنى. وبدأ عام ١٨٣٠ نشر أبحاثه العلمية فى المجلات البحثية، واستمر نشاطه العلمى بعد انتقاله إلى لندن عام ١٨٣٣ للعمل فى قطاع السكك الحديدية الذى كان قطاعًا سريع النمو آنذاك. وفى عام ١٨٣٩، ذهب وترستون إلى الهند حيث عمل مدرسًا للطلبة العسكريين فى شركة الهند الشرقية. وأتاحت له المدَّخَرات التى تمكن من جمعها أن يتقاعد فى عام ١٨٥٧، وعاد إلى موطنه ليتفرغ للبحث العلمى. لكنه واجه صعوبة مُطَّردة فى نشر أبحاثه؛ مما جعله يشعر بالمرارة وينعزل عن العالم، وفى يوم ١٨ من يونيو ١٨٨٣ غادر منزله بلا رجعة ولم يشاهده أحد بعد ذلك.

وكانت نقطة التحول فى حياة وترستون عندما أرسل فى عام ١٨٤٥، إلى الجمعية الملكية فى لندن، بحثًا أوضح فيه بعض الأفكار الجديدة المهمة عما يُعرف الآن بالنظرية الحركية للغازات. لقد بين وترستون كيف يتم توزيع الطاقة بين الذرات أو الجزيئات فى الغاز، وهى خطوة متقدمة ومهمة فيما أصبح فرعًا من فروع العلم بعد ذلك، هو الميكانيكا الإحصائية. وقررت الجمعية الملكية عدم نشر البحث، وذلك بعد استشارة اثنين من الخبراء اللذين لم يقدرا جهود هذا المدرس المجهول الذى يكتب من الطرف الآخر للعالم، وكانت النتيجة أن قبع البحث منسيًا بين ملفات الجمعية. وفى ذلك الوقت، قبل ظهور الآلات الكاتبة والناسخة، لم يهتم وترستون بأن يحتفظ لنفسه بنسخة من البحث، ولم يُعِدْ كتابته حتى يُنشر فى أى مكان آخر. وإن كان قد تم نَشر وتداول ملخصات موجزة لأفكاره، وذلك قبل إعادة اكتشاف أفكاره الأساسية الجديدة حول النظرية الحركية بحوالى خمسة عشر عامًا تقريبًا، على أيدى باحثَيْن آخرَيْن توصلا بشكل مستقل للأفكار نفسها وحظيا بكل تقدير. وفى عام ١٨٩١، بعد فوات الأوان بالنسبة لوترستون، عثر اللورد رايليه Rayleigh على بحثه فى أقبية الجمعية الملكية، وكان اللورد هو سكرتير الجمعية فى ذلك الوقت، فعمل على نشرها فى عام ١٨٩٢، وأثبت السبق لوترستون فيما يتعلق بالنظرية الحركية؛ مضيفًا تحذيرًا إلى شباب الباحثين من مقاومة الجمعيات العلمية للأفكار الجديدة.

وأثناء الفترة التى أمضاها ووترستون فى الهند، ربما فى نهاية الأربعينيات من القرن التاسع عشر، طور أفكاره عن الديناميكا الحرارية للشمس، ونال التقدير بعد

تقديمها للجمعية البريطانية فى اجتماع عُقد فى عام ١٨٥٣، حيث نُشرت بعد ذلك بوقت قصير. ومن سخريات القدر أن البحث الوحيد لوترستون الذى لفت أنظار المجتمع العلمى، وإن كان بشكل ثانوى، هو نفس البحث، على الأقل جزئيًا، الذى أعده ماير قبل ذلك بسنوات قليلة، وإن كان مجهولاً بالفعل فى ذلك الوقت. لقد أدرك كل من ماير ووترستون أنه مادامت الطاقة الكيميائية لا تكفى للمحافظة على حرارة الشمس لفترة تتجاوز بضع عشرات آلاف السنوات، فإنه يتعين وجود مصدر آخر للطاقة يغذى الشمس، وكان المصدر الآخر الوحيد للطاقة المعروف للعلم فى القرن التاسع عشر والذى يمكنه أن يحتفظ للشمس بسخونتها لفترة أطول من الزمن هو طاقة الجاذبية. وطبقًا لقانون بقاء الطاقة، فإن ما كان يحتاجانه هو مخزون من الطاقة يمكن السحب منه بشكل مطَّرد لملايين السنين وتحويله إلى حرارة. وكان يمكن لطاقة الجاذبية أن تحقق الهدف إذا ما تم اكتشاف وسيلة لتحويلها إلى حرارة.

لقد افترض كل من ماير ووترستون أن بإمكان الشمس أن تظل ساخنة إذا «زُوِّدت بوقود» بواسطة ذخيرة مستمرة من النيازك التى تسقط عليها من الفضاء. وهو مصدر طاقة ينبع مباشرة من مجال قوة جاذبية الشمس. وكما أدرك نيوتن، فإن النيزك ـ الذى هو فى الأساس قطعة من الصخر ـ عندما يسقط نحو الشمس، فإن ذلك يحدث بسبب قوة الجاذبية المتبادلة بين الاثنين. وتتحول طاقة الجاذبية إلى طاقة حركية، طاقة حركة، مع سقوط النيزك بسرعة متزايدة. وعندما تصطدم هذه الصخرة التى تتحرك بسرعة متزايدة بسطح الشمس ثم تتوقف، فإن كل تلك الطاقة ستذهب لا محالة إلى مكان ما. وبالطريقة نفسها تمامًا، عندما يتم إيقاف سيارة مسرعة باستخدام الكوابح، فإن كل الطاقة الناجمة عن حركة السيارة تذهب دون شك إلى مكان ما. وفى حالة السيارة، تتحول الطاقة إلى حرارة فى الكوابح، ويمكن استشعارها بسهولة إذا وضعت يدك قرب أسطوانات الكوابح بعد توقف السيارة مباشرة. وفى حالة سقوط نيزك على الشمس (أو على الأرض)، تتحول أيضًا الطاقة الحركية إلى حرارة، وترفع درجة حرارة كل من النيزك والجسم الذى يصطدم به، سواء كان هذا الجسم هو الشمس أو الأرض. وعندما يصطدم نيزك بالأرض، فإن التصادم يمكن أن يصهر الصخر بشكل انفجارى، محدثًا حفرة ضخمة بقوة عدة ملايين من الأطنان من الديناميت ـ اى اكبر بكثير من أى انفجار من صنع الإنسان، بما فى ذلك الانفجارات النووية. وبما أن الشمس تشكل كتلة أكبر من الأرض، فإن مجال قوة جاذبيتها يكون اقوى، وبالتالى تسقط النيازك بسرعة

اكبر عند اصطدامها بها، وتكون الطاقة المحرَّرة أكبر مما لو كان النيزك نفسه قد ضرب الأرض.

من حيث المبدأ يمكنك بالفعل أن تجعل الشمس ساخنة بهذه الطريقة، وذلك إذا كان هناك عدد من النيازك يكفى للسقوط عليها. ولا يوجد فى قوانين الفيزياء ما يفيد باستحالة تسخين نجم بهذه الطريقة، ولكن فى الكون الحقيقى، لا يوجد فى أى مكان قريب عدد كافٍ من النيازك للقيام بهذه المهمة. وقد أدرك وترستون ذلك، وعدل فيما بعد حجته حيث افترض أن الشمس تحافظ على حرارتها الداخلية بأن تنقبض تدريجيًا وتنكمش على نفسها؛ الأمر الذى يحول طاقة الجاذبية إلى حرارة. وقد أصبحت هذه الفكرة الأساسية حجر الزاوية للحجج التى استخدمها علماء الفيزياء فى النصف الثانى من القرن التاسع عشر «لإثبات» أن الشمس لا يمكن أن تكون قد وجدت بشكلها الحالى لأكثر من مائة مليون عام. وبعد إعطاء كل من ماير ووترستون حقهما من الإشادة بجهودهما الرائدة، حَرِىٌّ بنا أن نذكر أن أفضل طريقة لتقيْيم التأثير الكامل للحسابات التى أوجدت هذا التناقض مع المقاييس الزمنية التى طالب بها دارون وعلماء الچيولوچيا، هى إلقاء نظرة على أبحاث الرجل الذى أصبح أكبر نصير للمقياس الزمنى الذى يعتمد على طاقة الجاذبية، وهو وليم طومسون، الذى أصبح بعد ذلك لورد كلفن.

العبقرية الفيكتورية

ولد وليم طومسون وفى فمه ملعقة من فضة على المستوى العلمى، واستطاع أن يستفيد تمامًا من الفرص غير العادية التى أُتيحت له. عندما ولد فى عام ١٨٢٤ كان والده أستاذًا للرياضيات فى جامعة بلفاست. ونال تعليمه هو وأخوه الأكبر چيمس فى المنزل، حيث تلقيا وهما طفلان أحدث الأفكار الرياضية التى كانت جديدة حتى على المحاضرين الجامعيين (فضلاً عن الطلبة) فى ذلك الوقت، وأصبح كلاهما عالمًا ناجحًا، وإن كان وليم هو عالم الفيزياء البارز فى الأسرة (بالفعل، كان وليم طومسون وچيمس كليرك ماكسويل أعظم عالمَى فيزياء أنجبتهما بريطانيا فى القرن التاسع عشر). وفى عام ١٨٣٢، أصبح والدهما أستاذًا للرياضيات بجامعة جلاسجو التى التحق بها وليم عام ١٨٣٤ وهو فى سن العاشرة. وعندما بلغ السابعة عشرة، أى فى عام ١٨٤١، انتقل إلى جامعة كمبريدج حيث تخرج عام ١٨٤٥. وفى هذه الفترة بدأ بالفعل فى نشر أبحاث علمية. وقدم للقارئ الإنجليزى، وهو فى السادسة عشرة والسابعة عشرة، ملخصًا

لأبحاث فورييه الخاصة بانتقال الحرارة ودفاعًا عن نظريته، التى كان طومسون قد قرأها بالفرنسية، ولكنها لم تكن معروفة بشكل جيد فى بريطانيا حتى ذلك الحين. وطور طومسون أفكار فورييه بحيث لا يقتصر استخدام معادلاته على وصف تدفق الحرارة، بل حساب تدفق الطاقة بشكل عام، بما فى ذلك السوائل المتحركة عبر أنبوب والكهرباء المتدفقة عبر كابل.

وبعد تخرجه فى كمبريدج، عمل طومسون فى باريس لفترة من الوقت، لكن فى عام ١٨٤٦ أصبح منصب أستاذ فلسفة التاريخ الطبيعى فى جامعة جلاسجو شاغرًا. وبفضل الحملة الدقيقة التى خطط لها والده (فضلاً عن مهارته الواضحة)، رُشح طومسون للمنصب وهو فى سن الثانية والعشرين. واستقر هناك إلى آخر حياته العلمية، حيث تقاعد بعد ذلك بثلاثة وخمسين عامًا، أى فى عام ١٨٩٩. وبالرغم من أن لغز عمر الأرض والشمس كان موضع افتتان صاحبه طيلة حياته، إلا أنه كان مجرد وجه من الوجوه العديدة لتألقه العلمى، ففى عام ١٨٥١، قدم القانون الثانى للديناميكا الحرارية الذى ينص على أن الحرارة لا يمكن أن تنتقل من الجسم الأقل حرارة إلى الجسم الأعلى حرارة. وطور مقياسًا لدرجات الحرارة يبدأ من درجة حرارة الصفر المطلق، ـ ٢٧٣ درجة مئوية، وهى الدرجة التى تسكن عندها كل حركة حرارية للجزيئات والذرات فى أى جسم. وأصبح هذا المقياس لدرجات الحرارة يُعرف بمقياس كلفن تكريمًا له، وهو مقياس تتساوى درجاته مع حجم الدرجات المئوية، ولكنه يبدأ من الصفر المطلق وحيث يساوى الصفر المئوى مثلاً، ٢٧٣ كلفن.

لكن تلك الإنجازات لم توفر أسس شهرة طومسون فى نظر الجمهور فى إنجلترا الفيكتورية، وإنما اكتسب شهرته عن عمله فى تصميم أول كابل تلغراف ناجح مُد عبر الأطلنطى، وبذلك أتاح لمعادلات فورييه أن توضع موضع الاستخدام العملى المفيد. وفى عام ١٨٦٦، منحته الملكة فيكتوريا لقب فارس تقديرًا لهذا الإنجاز، وأصبح ثريًا نتيجة للأموال التى حصل عليها على براءة اختراع الكابل الخاص به (وابتكارات أخرى). ثم رُفع إلى طبقة النبلاء، فى عام ١٨٩٢ حيث أصبح بارون كلفن أوف لارجز، وذلك اعترافًا بإنجازاته الواسعة فى مجالَى: الهندسة والفيزياء.

إن الجمهور يعرف طومسون بشكل أفضل كمخترع بارع فى ظل التقاليد الفيكتورية العظيمة. لكن هذا العالِم القدير الذى تميز بإنجازاته العملية، ظل حائرًا فيما يتعلق

بنظرية عُمْر الأرض التى لم يفهمها منذ أن قام بصياغة القانون الثانى للديناميكا الحرارية فى عام ١٨٥١. ويفيد القانون الثانى، كما أدرك طومسون ذلك على الفور، أن الأرض تفقد حرارتها بشكل مطَّرد ولا يمكنها البقاء إلى الأبد - فالأشياء تَبْلَى. وكتب فى عام ١٨٥٢ يقول:

«فى غضون فترة سابقة محددة من الزمن كانت الأرض غير مناسبة لسكنى الإنسان، وسوف يتكرر ذلك فى حقبة أخرى قادمة، إلا إذا حدثت تفاعلات يستحيل قبول حدوثها بموجب القوانين التى تحكم العمليات المعروفة فى العالم المادى حاليًا».

لكن طومسون لم يتبع مباشرة هذه الخلاصة الواسعة بحسابات مفصلة لعمر الأرض، وذلك جزئيًا لأنه «تحول» إلى مشكلة الطاقة الشمسية، كما عبر عن ذلك المؤرخ جو بورشفيلد. ففى الاجتماع السنوى للجمعية البريطانية عام ١٨٥٣، أعلنت فرضية وترستون التى تقول إن الأرض تحتفظ بحرارتها نتيجة لسقوط النيازك عليها، وتبنَّى طومسون الفكرة على الفور وولع بها، وشرع فى حساب الفترة التى يمكن للشمس أن تحتفظ فيها بسخونتها بهذه الطريقة. وأمضى طومسون وقتًا طويلاً يحاول إنجاح فكرة النيازك، ولكنه اضطر فى آخر الأمر إلى التسليم بالهزيمة. ولا حاجة إلى سرد كل الخطوات الأليمة طالما أن النسخة النهائية لفكرة «النيزك» التى طورها طومسون أثبتت عجزها بوضوح. وعندما أصبح واضحًا عدم وجود عدد كاف من الأجسام الصخرية الصغيرة الموجودة فى النظام الشمسى لتوفير مقدار الطاقة المطلوبة للشمس، قدم طومسون فكرة كانت نوعًا من العبث، وهى أن الشمس تحافظ على نيرانها ليس باستهلاك النيازك فقط ولكن باستهلاك كواكب أخرى كاملة، واحدًا تلو الآخر. وطبقًا لهذه الفكرة، فإن عطارد، أقرب الكواكب للشمس، يجب أن يلف نحوها بشكل لولبى حتى يصطدم بها معطيًا إياها طاقة جاذبيته فى شكل حرارة - لكن ذلك سيوفر طاقة تكفى لإبقاء الشمس ساخنة لمدة سبع سنوات فقط. وسيكون أداء كوكب الزهرة أفضل قليلاً موفرًا طاقة تكفى لتسخين الشمس لمدة ٨٤ عامًا، وحتى نبتون، أبعد الكواكب المعروفة فى المجموعة الشمسية، لا يمكن أن يسهم إلا بطاقة تكفى للحفاظ على نيران الشمس ساخنة لمدة ألفىْ عام، وذلك لو سقط مباشرة على الشمس. وحتى إذا التهمت الشمس كل الكواكب فى النظام الشمسى تباعًا، فإنها لن تستطيع الحفاظ على نيرانها لأكثر من بضع آلاف من السنوات - وهكذا، فإن مخزون الوقود «النيزكى» ليس أفضل من المخزون الكيميائى.

وفى الستينيات من القرن التاسع عشر، استطاع طومسون تقديم طرح أفضل، وهو فكرة انكماش الشمس. لكن وترستون كان قد سبقه إليها عندئذ، وإن كانت أبحاثه لم تزل غير معروفة على مستوى واسع، وينطبق هذا أيضًا على باحث ألمانى هو هيرمان هلمهولتز (Hermann Helmholtz)، الذى كانت حياته العملية والمهنية قريبة الشبه بشكل غريب مع چوليوس ماير، بطل لغز الطاقة الشمسية الذى لم يَنَل التقدير الذى يستحقه.

ولد هلمهولتز فى بوتسدام عام ١٨٢١. وكان طفلاً معتل الصحة نادرًا ما يغادر منزله طوال السنوات السبع الأولى من حياته، لكن والده، الذى كان مدرسًا للفلسفة والأدب فى مدرسة للتعليم قبل الجامعى فى بوتسدام، تولى تعليمه. وأبدى هيرمان الصغير مهارة كبيرة فى الدراسة النظرية، وعندما اشتد عوده وتحسنت صحته التحق بالمدرسة التى يعمل بها والده فأبدى اهتمامًا خاصًا بالفيزياء. لكنه درس الطب بدلاً من الفيزياء؛ لأنه لم يكن بإمكان والده تحمل نفقات التحاق ابنه بالجامعة. ثم التحق بكلية الطب وفق ترتيب معين أعفاه من رسوم الجامعة مقابل التزامه بأن يخدم فى الجيش لمدة ثمانى سنوات بعد تخرجه. وطوال أربع سنوات فى معهد فريدريك ويلهلم ببرلين درس هلمهولتز الطب، وتدبر أمره لكى يأخذ دروسًا فى الفيزياء والرياضيات وأن يصبح عازف بيانو بارعًا. وتخرج عام ١٨٤٢ فى كلية الطب، وعاد إلى موطنه فى بوتسدام عام ١٨٤٣، حيث عمل جراحًا فى الوحدة العسكرية التى كانت تعسكر فى المدينة. ولم تكن واجباته الطبية شاقة؛ مما أتاح له فرصة إجراء تجارب فى معمل أنشأه بنفسه فى الثكنة العسكرية.

وتذكر السِّيَر الرسمية أن مهارة وسمعة هلمهولتز كعالم سرعان ما تعاظمت حتى إنه «أُعفى» من واجباته العسكرية عام ١٨٤٨، غير أن هناك إشارات توحى إلى أنه بعد حصوله على إذن رسمى بالتغيب للقيام بأعمال علمية رفض العودة للحياة العسكرية مرة أخرى، فسُرِّح فعلاً من الخدمة العسكرية مغضوبًا عليه. لكنه رُشِّح فى عام ١٨٤٩ أستاذًا مساعدًا للفسيولوچيا (علم وظائف الأعضاء) فى كونيجسبرج، ثم تولى العديد من المناصب الجامعية على امتداد حياته العلمية والمهنية الطويلة والمتميزة. وفى عام ١٨٤٨، اكتشف بشكل مستقل قانون بقاء الطاقة، من بحث على الحرارة التى تنتجها عضلات الحيوانات. وهو تقريبًا نفس الطريق الذى قاد ماير إلى اكتشافه ذلك القانون

قبل ذلك بعدة سنوات. الأمر الذى قاد هلمهولتز بدوره، كما حدث مع ماير، إلى المزيد من البحث فى الديناميكا الحرارية، وإلى إسهاماته فى الجدل حول أصل طاقة الشمس.

وقد ظهر أول إسهام لهلمهولتز فى هذا المجال فى فبراير ١٨٥٤، قبل أن يقدم طومسون بحثه الأول عن فرضية تصادم النيزك بالشمس إلى الجمعية البريطانية بشهور قليلة. من المحتمل أن يكون طومسون قد رأى بحث هلمهولتز بعد اكتمال بحثه ولكن قبل أن يقدمه لذلك الاجتماع. إن الفكرة الجديدة البسيطة والألمعية التى أسهم بها هلمهولتز هى افتراض أن كل كتلة الشمس ذاتها، وليس فقط الكواكب، لا بد أن توفر طاقة الجاذبية اللازمة لتجعلها ساخنة. كانت الحجة مباشرة وواضحة. إذا كانت الشمس كلها مصنوعة من الصخر وأن هذا الصخر تفتت إلى أجزاء صغيرة، وقُذف بها كلها فى الفضاء، فى هذه الحالة سيكون لدى كل جزء كمية كبيرة من طاقة الجاذبية وستسقط كلها نحو مركز سحابة الأحجار. ويمكننا حساب أو قياس الطاقة المتضمنة فى ذلك عن طريق كمية الشغل التى كان يتعين بذلها لبعثرة الصخور بعيدًا عن بعضها البعض. وينطبق الشىء نفسه على حالة شخص يحمل جسمًا ثقيلاً ويصعد به مجموعة متواصلة من درجات السلم، حيث يتطلب منه ذلك مجهودًا كبيرًا، لأن الجسم الثقيل تم رفعه فى مجال جاذبية فحصل بذلك على طاقة. وإذا رمى الشخص ذلك الجسم الثقيل من النافذة فإنه يسقط ويرتطم بالأرض، وعندئذ يتوقف وترتفع درجة حرارته. لقد تحولت طاقة الجاذبية أولاً إلى طاقة حركة ثم إلى حرارة.

إن طاقة الحركة التى توفرها كتلة كل الكواكب الساقطة على الشمس يمكن فقط أن تحافظ على درجة حرارتها، كما هى الآن، لعدة آلاف من السنوات فقط. لكن طاقة الجاذبية التى توفرها كتلة الشمس نفسها، والتى انتثرت أصلاً فى شكل سحابة من الصخور، ثم سقطت هذه الصخور فى اتجاه الداخل (محولة طاقة الجاذبية إلى طاقة حركة) وانسحقت معًا فى كرة منصهرة من النار (محولة طاقة الحركة إلى حرارة)، ستطلق كمية من الطاقة تساوى تلك التى تشعها الشمس لمدة عشرين «مليون» عام. لم يُجْرِ هلمهولتز حسابًا دقيقًا فى ذلك الوقت، إنما أشار فقط إلى أن قدرًا هائلاً من الطاقة يمكن أن يتحول إلى حرارة بهذه الطريقة. وسرعان ما وضع طومسون الأرقام فى المعادلات، لكنه لم يفكر كثيرًا فى الاقتراح، إذ كان يعتبر أن فكرة أن تكون المادة

الأصلية للكون عبارة عن سحابة من قطَع الأحجار غير المنتظمة فكرة غير قابلة للتصديق. بالإضافة إلى ذلك، ما ميزة أن تكون الشمس قد أنتجت عند تكوُّنها طاقة تساوى عشرين مليون ضعف الطاقة التى تشعها سنويًا، أنتجتها مرة واحدة؟ إن الأمر يتطلب طريقة لتحرير الطاقة ببطء على امتداد ملايين السنين، وليس وسائل توليد انفجار كونى هائل.

مقاييس كلفن الزمنية

فى عام ١٨٥٤، لم يُعِرْ أحد إسهامات طومسون أو هلمهولتز اهتمامًا، وسرعان ما انشغل طومسون بموضوعات أخرى. وفى ديسمبر ١٨٦٠، وقع حادث سعيد (بالنسبة للعلم، ولكنه كان أليمًا بالنسبة لطومسون، بلا أدنى شك) وتركه الحادث بساق مكسورة، ومتسع من الوقت للتفكير وهو ممدد على السرير. وكان ذلك بعد عام بالضبط من نشر كتاب دارون «الأصل»، وقد يكون ذلك هو السبب فى أن أحد الأشياء التى فكر فيها طومسون كان أصل مخزون طاقة الشمس، وقضية عمر الأرض والشمس. وقد ظهرت ثمار تفكيره عام ١٨٦٢ فى مجلة مكميلان، وأحدثت تأثيرًا كبيرًا هذه المرة.

فى ذلك الوقت، اعتمد طومسون فى حججه بشكل كبير على صورة كتلة من النيازك القادمة معًا فى وقت واحد، ولم يهتم كثيرًا بكيفية اختزان كمية الطاقة الكبيرة المتاحة وكيفية السماح لهذه الطاقة أن تقطر ببطء عبر ملايين السنوات، ولكنه ركز اهتمامه على حساب كمية الطاقة المتاحة والمدة التى يمكنها «إذا» انتشرت، أن تحتفظ بالشمس مشعة بدرجة سطوعها الحالية. وقد أثبتت النظرية بشكل تقريبى، أن هناك كمية طاقة مخزونه فى سحابة الصخور الأصلية تكفى لتوفير إنتاج طاقة شمسية بالمعدلات الحالية، لمدة تتراوح ما بين عشرة إلى عشرين مليون عام. وحتى بقبول احتمال وجود أخطاء فى الحسابات أو فى الافتراضات التى بُنيت عليها، كان طومسون لا يرى طريقة تسمح بزيادة ذلك الرقم بمُعامِل أكثر من عشرة أضعاف تقريبًا، وقد عبر عن ذلك فى أحد مقالاته قائلاً:

«لعل من المرجح أن الشمس لم تضئ الأرض لمدة مائة مليون عام، ومن المؤكد تقريبًا أنها لم تفعل ذلك لمدة خمسمائة مليون عام. وبالنسبة للمستقبل، وللملايين من الأعوام

القادمة، يمكننا القول بنفس الدرجة من اليقين إنه لن يكون بإمكان سكان الأرض الاستمرار فى التمتع بضوء وحرارة الشمس الضرورية لحياتهم، إلا إذا كانت هناك مصادر للطاقة لا نعرفها حاليًا يجرى إعدادها فى مخزن الخلق الشاسع».

إن هذه التعليقات تحمل بشكل واضح قدرًا كبيرًا من التنبؤ، لكن المؤكد أن طومسون لم يكن يتوقع حقًا اكتشاف مصادر الطاقة المجهولة بالنسبة للعلم فى القرن التاسع عشر، كما يتضح من هجومه على داروين بعد ذلك فى المقال المشار إليه.

كان داروين قد قام بين أشياء أخرى، بحساب المدة التى يجب أن تستغرقها عملية التعرية لكى تؤدى إلى المظهر الحالى لتلال ووديان الطباشير فى النجد الإنجليزى، وقد اعتمد فى ذلك على وجهه نظر ليل القائلة بأن التغيرات الچيولوچية فى تاريخ الأرض ترجع إلى عمليات لاتزال نشطة حتى الآن، وعلى قياسات أظهرت أن الجروف الطباشيرية تتآكل بمعدل بوصة كل قرن. وقصد داروين أن يكون الحساب موضحًا للقياس الزمنى الطويل للأرض، لكنه أنجز هذا العمل بلا مبالاة تقريبًا وعاش ليندم على أنه قام بنشره. ورغم بعض المغالاة فى الرقم الذى توصل إليه داروين، لكنه لا يتعارض بشكل صارخ مع المقياس الزمنى الذى نتصوره حاليًا لتطور الأرض والذى يُقدر بعدة مليارات من الأعوام. ومع ذلك كان الرقم الذى قدمه داروين ـ بالنسبة لطَوْر حديث نسبيًا من النشاط الچيولوچى ـ أكبر من الرقم الذى حسبه طومسون لعمر الشمس. وقد كان طومسون قاسيًا فى رده على تقدير داروين:

«إذًا، ما الذى يجعلنا نفكر فى تقديرات چيولوچية مثل ٣٠٠ مليون عام لتعرية النجد الإنجليزى؟ وهل من الأرجح أن تختلف الظروف الفيزيائية لمادة الشمس الغامرة عن تلك التى تواجهها المادة فى معاملنا، طبقًا للافتراض الذى تدعونا إليه الديناميكا، أم أن بحرًا عاصفًا، مع تيارات بحرية شديدة العنف، سوف يتعدى على جرف طباشيرى بمعدل أسرع ألف مرة عن تقدير السيد داروين القائل ببوصة كل قرن؟».

وبدأ طومسون جدلاً ومعركة استمرت باقى القرن التاسع عشر، واضطر أنصار نظرية التغير التدريجى المنتظم لكوكب الأرض إلى اتخاذ موقف الدفاع فى تلك المعركة. وسرعان ما أتبع مقاله عن حرارة الشمس فى عام ١٨٦٢ بحسابات جديدة عن عمر

الأرض تعتمد على تطبيق معادلات فورييه الخاصة بتدفق الحرارة. وقد افترض طومسون أن الأرض تكونت فى حالة منصهرة نتيجة للحرارة المتولدة من تصادم النيازك - وهى قريبة جداً من الصورة التى لدى علماء الفلك الآن. وكان يعرف أن القياسات التى أُجريت فى المناجم قد أظهرت أن داخل الأرض لا يزال ساخنًا عن القشرة الخارجية، واستخدم طومسون فيزياء الصوت والقياسات المعروفة لزمن انتقال الحرارة عبر بطانة عازلة من الصخر، لحساب المدة التى استغرقها الكوكب المنصهر الأصلى لكى يبرد ويصل إلى حالته الراهنة. وتوصل إلى أن عمر الأرض هو ٩٨ مليون عام، ولحسن الحظ، اتفق هذا الرقم تقريبًا بالضبط مع حسابه لعمر الشمس. وحتى لا يتجاهل هامش الخطأ، قال طومسون بحذر إن الحسابات التى توصل إليها تضع حدودًا للعمر المعقول للأرض. ويتراوح هذا العمر ما بين عشرين مليون عام ومائتى مليون عام، ولكن ليس هناك مجال (فى إطار قوانين الفيزياء المعروفة لطومسون) لإمكانية أن تكون الأرض قديمة بالدرجة التى يفترضها داروِن وعلماء الچيولوچيا. وكانت حسابات طومسون خالية من الأخطاء، كما كانت الخلاصات التى توصل إليها سليمة. لقد اعتقد أنه يمكن وصف الكون بأكمله بواسطة مجموعة قوانين الفيزياء نفسها التى تصح فى المعمل وعلى الأرض، وتمسك بذلك المعتقد بقوة. إن الحسابات التى توصل إليها لعمر كل من الشمس والأرض، كل على حدة، والتى أعطت العمر نفسه تقريبًا لكل منهما، قد عززت، فى الواقع من موقفه فى الجدل الذى أعقب ذلك.

كان طومسون، من ناحية ما، أكثر ثباتًا فيما يتعلق بآرائه ووجهات نظرة عن داروِن، ففى الطبعات اللاحقة لكتابه «الأصل» بدا داروِن واقعًا فى شَرَك حسابات طومسون لعمر الشمس والأرض، حتى إنه تبنى بعض الأفكار التى لا تحظى حاليًا بالمصداقية، وذلك فى محاولة لإيجاد طريقة لتسريع مُعدَّل التطور. ولذلك، تُعد الطبعة الأولى لعمله الكبير «أصل» هى أفضل وأوضح عرض لأفكاره.

ورغم أن أنصار نظرية التطور التدريجى المستمر لكوكب الأرض اضطروا إلى القيام ببعض الانسحاب التكتيكى، فإن الجدل استمر، بينما واصل طومسون مراجعة حساباته وتحسينها. وفى عام ١٨٨٧، توصل إلى النسخة الموجودة حاليًا فى العديد من الكتب التى يدرسها الطلاب، والتى تقدم الوصف الكامل لكيف يصبح نجمٌ مثل الشمس ساخنًا

فى بادئ الأمر. إن الفكرة تعتمد فى الحقيقة على اقتراح تقدم به هلمهولتز فى عام ١٨٥٤ فى بحثه عن حرارة الشمس ـ لكن طومسون لم ينسب أى فضل لهلمهولتز عندما قدم حساباته فى المحاضرة التى ألقاها فى الجمعية الملكية فى لندن عام ١٨٨٧، ولعله نسى أن هلمهولتز هو الذى سبق أن رسم معالم الطريق.

لقد كانت السمة المهمة فى الخطوة النهائية لبحث طومسون عن حرارة الشمس هى إدراك أن المهم ليس كون «الصخور» الأصلية التى تكونت منها الشمس صغيرة أو كبيرة، طالما أن الكمية نفسها من المادة ـ الكتلة نفسها ـ هى المستخدمة. إن طاقة حركة تصادم نصفَى الشمس عند سقوطهما مباشرة نحو بعضهما البعض من مسافة بعيدة جدًا، مساوية لطاقة حركة انهيار سحابة من النيازك نحو مركزها. ويمكن أيضًا أن تكون الأجسام المشاركة فى هذا التصادم «أصغر» بكثير من الصخور النيزكية التى تم تصورها فى الصيغة السابقة للنظرية. قد تكون حصًى صغيرًا، حصبًا أو سحابة من التراب ـ لكن الطاقة المتاحة تكون هى نفسها، طالما أن لها نفس الكتلة الكلية. وكذلك ستكون الطاقة المتاحة هى نفسها إذا كانت السحابة الأصلية التى تكونت منها الشمس عبارة عن ذرات وجزيئات ـ سحابة من «الغاز» انتشرت أصلاً على امتداد حجم هائل ثم انهارت تحت تأثير قوة جاذبيتها الذاتية (تحت ثقل وزنها). وفى ذلك الوقت، تقلصت هذه السحابة الغازية المنهارة حتى بلغت حجم الشمس الحالى تقريبًا، وقد تصل درجة الحرارة فى قلبها إلى ملايين الدرجات المئوية، بينما يتوهج سطحها بحرارة تصل إلى بضع آلاف من الدرجات المئوية. ويقبل علماء الفلك ذلك الآن على أنه أقرب تفسير لكيفية عمل النجوم وسلوكها.

وعندما يصبح الجزء الداخلى من هذا النجم الأول ساخنًا لدرجة معينة يتولد قدر كبير من الضغط نحو الخارج، لأن الحرارة تجعل الجسيمات الذرية شديدة النشاط. وتؤدى عملية الاصطدام القوية للجسيمات مع بعضها البعض إلى تماسك النجم ضد مزيد من الانهيار، لأنه لا يمكن أن ينهار بالكامل طالما كان ساخنًا من الداخل، وكان طومسون يعرف أن الحرارة المنبعثة من المركز ستستغرق وقتًا طويلاً لكى تشق طريقها إلى الخارج. لكن ما الذى يمكن أن يحدث عندما تبرد قليلاً هذه الكرة المتوهجة من الغاز؟ كان لدى طومسون (وهلمهولتز) الإجابة. لو كانت الشمس عبارة عن كرة من الغاز

المتوهج وبردت قليلاً من الداخل، فإنها ستبدأ فى الانكماش. ولكن ما الذى سينطوى عليه هذا الانكماش؟ سوف تتحرك كل الجسيمات الذرية فى الشمس وتكون أقرب إلى المركز ـ وقد تسقط فى مجال الجاذبية. وما الذى يحدث عندما تسقط الأشياء فى مجال جاذبية؟ إنها تكتسب طاقة حركة وتتحول هذه الطاقة إلى حرارة عند تصادمها مع بعضها البعض! كل ذلك كان مطلوبًا لتأمين تحرُّر طاقة الجاذبية المختزنة فى الشمس أو انطلاقها ببطء، على امتداد ملايين السنوات وانكماش الشمس ببطء أيضًا بمعدل خمسين مترًا سنويًا تقريبًا. إن هذه العملية لم توفر مزيدًا من الطاقة ـ فقد ظل المجموع محصورًا فى عشرين مليون عام من المخزون التى قدَّرها طومسون من قبل. لكن ذلك وفر وسائل انتشار الحرارة على امتداد عشرين مليون عام بدلاً من انطلاقها فى انفجار واحد هائل. وقد كان الانكماش المطلوب، بمعدل خمسين مترًا فى العام، صغيرًا جدًا بالطبع بحيث يتعذر قياسه بواسطة علماء الفلك فى القرن التاسع عشر، وبالتالى لم يلحظ أحد ذلك ولم تكن هناك مشكلة على الإطلاق.

ولما كان طومسون قد ركز الانتباه على مثل هذا المقياس الزمنى المحدود، فإن أنصار التطور التدريجى والمستمر لكوكب الأرض اصبحوا أقل ميلاً للقبول به، بالرغم من أن تفكيره الفيزيائى كان يتقدم ويتحسن فى كل مرحلة. ولعلهم كانوا سيحاولون قبول رقم ٥٠٠ مليون عام، لكن عشرين مليون عام لم تكن كافية لتفسير التغيرات التى طرأت على الأرض وسكانها من الكائنات الحية منذ أن تكونت. وبشكل ما، كان المقياس الزمنى لطومسون ضحية لنجاح هذا المقياس نفسه، فكلما أشار بوضوح متزايد إلى عمر منخفض للأرض والشمس، تبين أن هناك صراعًا وخلافًا حقيقيًا بين كل من علماء الفيزياء والچيولوچيا.

وقد كتب طومسون فى عام ١٨٨٩ يقول: «أعتقد أن من التهور البالغ افتراض إمكانية امتداد عمر ضوء الشمس لأكثر من عشرين مليون عام فى تاريخ الأرض، أو الاعتقاد ببقائه أكثر من خمسة أو ستة ملايين عام قادمة». وفى عام ١٨٩٢، الذى حصل فيه على رتبة نبيل فى سن الثامنة والستين، كرر تقريبًا التعليق نفسه الذى قاله عام ١٨٥٢ عندما كان فى الثامنة والعشرين من عمره، لكن الأرقام كانت تعضد قوله فى تلك المرة:

«فى غضون فترة سابقة محددة من الزمن كانت الأرض غير مناسبة لسكنى الإنسان، وسوف يتكرر ذلك فى فترة أخرى قادمة، إلا إذا حدثت تفاعلات يستحيل قبول حدوثها بموجب القوانين التى تحكم العمليات المعروفة فى العالم المادى حاليًا».

وبحلول عام ١٨٩٧، قبل طومسون الذى كان معروفًا وقتئذ باسم كلفن برقم ٢٤ مليون عام كأفضل تقدير لعمر الشمس والأرض.

كانت كل حسابات طومسون، مثل حسابات أناكزاجوراس، دقيقة وبعيدة عن أية أخطاء. والآن، وبعد قرن من المراقبة والملاحظة للشمس والنجوم، وإجراء المزيد من الحسابات التطبيقية لقوانين الديناميكا الحرارية، وبمساعدة أجهزة الكمبيوتر، اتفق علماء الفلك على أن نجمًا مثل الشمس يمكن أن يحافظ على سخونته بالانكماش البطىء لمدة لا تزيد على عشرات قليلة من ملايين السنين، وهذا هو مقياس كلفن - هلمهولتز الزمنى. وتلك هى كل الطاقة المتاحة من تحول طاقة الجاذبية إلى حرارة. وقبل نهاية القرن التاسع عشر، كان واضحًا أن هذا الرقم لا يتفق مع متطلبات الچيولوچيا ونظرية النشوء والارتقاء أو نظرية التطور. وفى عام ١٨٩٩، كان لا بد من تقديم شىء جديد، وجاء توماس شمبرلين (Thomas Chamberlain)، أستاذ الچيولوچيا بجامعة شيكاغو ليشير إلى بداية الطريق.. لقد حرص طومسون دائمًا على الإشارة إلى أن السبيل الوحيد لتوفير مقياس زمنى أطول للشمس هو التماس مصادر طاقة غير معروفة وقوانين فيزياء جديدة، ولكن أسلوبه فى تناول الأمر يدل على أنه يستخدم ذلك كمثال على شىء بالغ السخافة لدرجة عدم إمكانية أخذه على محمل الجد. غير أن شمبرلين كان مستعدًا لتأمل ما لا مجال للتفكير فيه، وقد كتب معلقًا فى مجلة ساينس (Science) يقول:

«هل معرفتنا الحالية بسلوك المادة فى ظل ظروف غير عادية مثل تلك الموجودة داخل الشمس كاملة بما يكفى بحيث يسمح بالجزم بعدم وجود مصادر أخرى مجهولة للحرارة قابعة هناك؟ إن التكوين الداخلى للذرات لا يزال مجالاً خصبًا للبحث. فلعل هناك تنظيمات بالغة التعقيد ومراكز لطاقات هائلة. ولا يمكن، بالطبع، للكيميائى الحذر أن يجزم أن الذرات بسيطة وأوّلية حقًا، أو أنها لا تحبس داخلها طاقات عظيمة المقدار. لا يوجد كيميائى حذر يمكنه أن... يؤكد أو ينفى أن الظروف غير العادية الموجودة فى مركز الشمس لا يمكنها أن تحرر جزءًا من هذه الطاقة».

لقد عادت الچيولوچيا تحارب من جديد، وكانت على حق فى ذلك، وكان المجتمع العلمى مهيئًا لقبول تفسير جديد تمامًا لكيفية احتفاظ الشمس بنيرانها. ورغم أن دلالات على ذلك المصدر «الجديد» للطاقة كانت متاحة عندما كتب شمبرلين تلك الكلمات، إلا أن الأمر استغرق ثلاثين سنة كاملة لتوضيح الخطوط العريضة لما يجرى داخل الشمس، وأكثر من أربعين عامًا حتى يتم التعرف على التفاصيل.

الفصل الثانى

مراكز الطاقات الهائلة

ما مقدار الحرارة التى تنتجها الشمس؟ وما «الطاقات الهائلة» التى نحتاج إلى تحريرها من الذرة لكى نثبت أن شمبرلين (Chamberlain) على صواب؟ إن إنتاج الشمس للطاقة لا يُعتبر أمرًا خارقًا إلى هذا الحد ولو بالمقارنة بمعدل إنتاج الطاقة هنا على الأرض حتى من خلال التفاعلات الكيميائية. فى بداية الستينيات، طرح چورچ جامو (Georges Gamow) فى كتابه «نجم اسمه الشمس» على بساط البحث تشابهًا مدهشًا، حيث سأل، إذا عُرض إعلان يقول إن إناء للقهوة ينتج حرارة بنفس معدل إنتاج الحرارة (فى المتوسط) داخل الشمس، فكم من الوقت تستغرق المياه لكى تصل إلى درجة الغليان؟

وكانت الإجابة المدهشة عن سؤال جامو أنه حتى لو تم عزل الإناء تمامًا، بحيث لا يمكن للحرارة أن تتسرب منه، فإن غليان الماء قد يستغرق عدة شهور. فكل جرام من كتلة الشمس ينتج فى المتوسط قدرًا قليلاً جدًا من الحرارة، كما يتضح ذلك من عملية حسابية بسيطة. إن مساحة سطح الشمس $٦،٠٧ \times (١٠)^{٢٢}$ سم^{٢} حيث يبلغ نصف قطرها $٦،٩٥ \times (١٠)^{١٠}$ سم، ويعبر هذه المساحة كل ثانية $٨،٨ \times (١٠)^{٢٥}$ سعر من الطاقة الحرارية. ومن ناحية أخرى، فإن كتلة الشمس تُقدر بـ $٢ \times (١٠)^{٣٣}$ جرام. ومن ثَم يتعين على كل جرام من المادة أن ينتج فى المتوسط $٤،٤ \times (١٠)^{-٨}$ سعر فى الثانية فقط - أى أقل من نصف على عشرة ملايين من السعر فى الثانية. إن ذلك لا يُعد منخفضًا فقط بمعايير إناء القهوة، بل إنه أقل بكثير من معدل انطلاق الحرارة فى جسمنا خلال العمليات الكيميائية للأيض البشرى.

ويرجع السبب فى أن مثل هذا الإنتاج المتواضع من الطاقة، مقارنة بكتلة الشمس وحجمها، يكفى للحفاظ عليها ساخنة، إلى أن الحرارة لا يمكنها الانبعاث من داخل الشمس إلا من خلال السطح فقط، وهى مساحة تعتمد على مربع نصف القطر. ولأن الكتلة والحجم يتناسبان مع مكعب نصف القطر، فإنهما يزدادان بسرعة أكبر من مساحة السطح عند مقارنة أجسام كروية ذات أنصاف أقطار أكبر وأكبر بشكل مطَّرد. ففى كل مرة يتضاعف فيها نصف القطر، تزيد مساحة السطح أربعة أضعاف بينما يصبح حجم الجسم الكروى أكبر بثمانية أضعاف.

ويمكننا رؤية هذا التأثير عمليًا بوضوح تام، فى الحيوانات ذات الدم الدافئ. فالفأر مثلاً حجمه صغير جدًا، وكذلك كتلته غير أن مساحة سطح جسمه كبيرة نسبيًا؛ ولذلك فإنه يفقد الحرارة سريعًا ويتعين عليه بالتالى أن يبقى فى حالة نشاط دائمة وأن يأكل بشكل مستمر تقريبًا لكى يحافظ على درجة حرارة جسمه. وفى الجانب المقابل، فإن للفيل كتلة كبيرة ومساحة سطح صغيرة نسبيًا، وبالتالى لديه مشكلة فى التخلص من الحرارة. لذلك نَمَتْ له أذان كبيرة تقوم بدور الرادياتور أو المشعاع(*)، فضلاً عن أنه يقضى وقتاً طويلاً يرش الماء وينثره على جسمه، كلما تيسر له ذلك. إن الحرارة المتولدة من عمليات الأيض داخل جسمه تكفى لاستخدامها فى الطهى.

وبالتالى، أدرك علماء الفلك فى القرن التاسع عشر، أنه من السهل جعل الشمس ساخنة بما يكفى لكى تضىء باستخدام كمية متواضعة من طاقة الجاذبية التى تنطلق أثناء انكماش الشمس. بل إن احتراق الفحم يمكن أن يُبْقى على الشمس ساخنة، لبعض الوقت. إن المشكلة تكمن فى تفسير كيف تمكنت الشمس من أن تضىء طوال هذه المدة الطويلة. وهو المجال الذى استطاعت الفيزياء الجديدة فى التسعينيات من القرن الماضى وبدايات القرن العشرين أن تقدم فيه يد العون لعلم الفلك.

الكشف عن الطاقة الإشعاعية(**)

فى أول مارس ١٨٩٦، اكتشف هنرى بيكريل (Henri Becquerel) أثناء عمله فى باريس الظاهرة التى نعرفها حاليًا بالنشاط الإشعاعى. وأدى اكتشافه إلى التحقق من

(*) هى شبكة من الأنابيب تُستخدم لتبريد محرك السيارة. (المترجم).

(**) هنرى أنطوان بيكريل (١٨٥٢ - ١٩٠٨) فيزيائى فرنسى ولد فى باريس. وحصل على جائزة نوبل مناصفة مع الزوجين مارى وبيير كورى عام ١٩٠٣ تقديرًا لاكتشافه لإشعاعات بيكريل المنبعثة من أملاح اليورانيوم، وكان من نتائج اكتشافاته التمكن من عزل عنصر الراديوم.

أن الذرّة قابلة للانقسام، وإلى تحديد هوية مصدر طاقة الشمس والنجوم. إلا أن هذا الاكتشاف حدث جزئيًا بالصدفة، واستغرق الأمر سنوات عديدة قبل أن يصبح حجر الزاوية لعلمَى الفيزياء والفلك.

وُلد بيكريل العضو الثالث من سلالة فريدة من علماء الفيزياء الفرنسيين البارزين. فى باريس فى ١٥ من ديسمبر ١٨٥٢، وبالرغم من أنه تدرب كمهندس وأصبح كبير مهندسى قسم الطرق فى باريس، فإن القَدَر والعرف العائلى كانا كفيلين بأن تصبح إنجازاته الباقية فى مجال الفيزياء. وكان التاريخ العائلى قد بدأ مع أنطوان، جد هنرى، الذى أجرى أبحاثًا على بعض الظواهر الكهربية وظاهرة التألق(*)، وحقق نجاحًا فيها، حتى أن المتحف الفرنسى للتاريخ الطبيعى خصص له كرسى أستاذية فى الفيزياء فى عام ١٨٣٨. وكان إدموند، الابن الثالث لأنطوان، يساعد أباه فى تلك التجارب، كما جذبته دراسة المواد الصلبة المتفسفرة، وهى بللورات تتوهج فى الظلام. وقد ذكر إدموند بيكريل فى بحث علمى نُشر فى مجلة «كونت رندو» (Comptes Rendus) فى عام ١٨٥٨ «أن مركبات اليورانيوم هى الأجسام التى تحدث أقوى تأثيرات التألق». وعندما تُوفِّى والده فى عام ١٨٧٨، خلفه إدموند كأستاذ فى المتحف.

ومن ثَم لم يندهش أحد عندما بدأ هنرى، بالرغم من تدريبه الهندسى، فى مساعدة والده فى المعمل فى عام ١٨٧٥. وسرعان ما أثبت قدرته كفيزيائى. وفى عام ١٨٨٩، تم اختياره عضوًا فى أكاديمية العلوم وكان عمره ٣٦ عامًا فقط، وعندما تُوفِّى والده عام ١٨٩١ أصبح ثالث شخص وثالث بيكريل يحتل كرسى أستاذ الفيزياء فى متحف التاريخ الطبيعى. وفى الوقت المناسب، خَلَف چان ابن هنرى الوحيد أباه على كرسى الأستاذية (تُوفِّى هنرى عام ١٩٠٨). وبعد ١١٠ أعوام من إنشاء كرسى الفيزياء بالمتحف الفرنسى للتاريخ الطبيعى، وفى عام ١٩٤٨ فقط، خرجت الأستاذية من عائلة بيكريل عندما مات دون أن يخلف وريثًا. لكن من كل هذه السلالة المتميزة، كان هنرى هو الذى يخلود العلمى بالاكتشاف الذى توصل إليه فى باريس فى ذلك اليوم الرمادى من ١٨٩٦.

(*) انبعاث لضوء، كما فى حالة التفسفُر والتفلّوُر، ليس نتيجة لتوهج حرارى مباشر ويحدث عند درجة حرارة أقل من درجة حرارة الأجسام المتوهجة. (المترجم).

بالنسبة لعلم الفيزياء، كان العقد الأخير من القرن التاسع عشر فترة مثيرة جدًا، حيث حفلت باكتشافات جديدة فى مجال طبيعة المادة والطاقة الإشعاعية. لقد قادت هذه الاكتشافات إلى فهم جديد تمامًا لطبيعة العالم المادى، ومهدت لنشوء أكبر نظريتين فى القرن العشرين، وهما: فيزياء الكَمّ والنظرية النسبية. وفى التسعينيات من القرن العشرين، كان العديد من الفيزيائيين على ثقة من أنهم سيتمكنون قريبًا من توحيد هاتين النظريتين الكبيرتين فى حزمة واحدة، أو وصف موحد للطبيعة، مستكملين بذلك الثورة التى بدأت بالفعل منذ مائة عام تقريبًا، أى فى عام ١٨٩٥، باكتشاف الأشعة السينية. إن هذا الاكتشاف هو الذى قاد إلى أبحاث بيكريل فى مجال الطاقة الإشعاعية، وإلى اكتشاف مصدر طاقة النجوم.

عندما اكتشف العالم الألمانى ويلهلم رونتجن (Wilhelm Röntgen) الأشعة السينية، وهو فى الخمسين من عمره، كان وراءه نجاح مهنى متميز؛ حيث كان أستاذًا للفيزياء فى جامعة فورزبرج (Wörzburg)، وأصبح مهتمًا بالبحث فى مجال الأشعة الكاثودية. وتنبعث هذه «الأشعة» (التى نعلم الآن أنها تيارات من الإلكترونات) من القطب السالب (الكاثود) لأنبوب تفريغ كهربائى، وهو عبارة عن أنبوب زجاجى شبه أسطوانى مفرغ. ويُعد مثل هذا الأنبوب السلف المباشر لأنبوب الصورة فى جهاز التلفاز الحديث، حيث يتم رسم الصورة على شاشة التلفاز بواسطة إلكترونات طائرة منبعثة من القطب السالب (الكاثود) فى الطرف الآخر من الأنبوب. وقد كان كل ذلك، على أية حال، يكمن بعيدًا فى المستقبل عندما بدأ رونتجن فى دراسة أشعة الكاثود عام ١٨٩٥.

ففى يوم الجمعة ٨ من نوفمبر، وبينما كان رونتجن فى معمله المظلم، حيث كان الأنبوب الزجاجى مغطّى بكرتون أسود رقيق، لاحظ بالصدفة أن حاجزًا ورقيًا مدهونًا بمادة سيانيد بلاتين الباريوم، يقع قرب الجهاز، يتوهج كلما تم توصيل الأنبوب بمصدر كهربائى. وكان قد أثبت من قبل قدرة أشعة الكاثود على الانتقال لبضعة سنتيمترات فقط خارج الأنبوب، لكن الحاجز، الذى لم يُستخدم فى التجربة، كان يبعد عن الأنبوب بحوالى المتر. إذًا، هناك شىء آخر جعل الورق يتوهج - وسرعان ما اكتشف رونتجن هذا الشىء الآخر الذى يجعل الحاجز يتوهج عند تشغيل الأنبوب، حتى بعد نقله إلى الغرفة المجاورة. وبذلك اكتشف رونتجن أشعة إكس، وهى شكل لم يكن معروفًا من قبل للأشعة التى تنفذ خلال المواد.

وتم إعلان هذا الاكتشاف فى أول يناير ١٨٩٦، وكان يتضمن إمكانية استخدام أشعة إكس لتصوير العظام البشرية عبر اللحم الحى. وأثار النبأ ضجة فى الأوساط العلمية وفى الصحافة، وكانت الصحف الأوروبية تتابع هذه التقارير بشكل لحظى تقريبًا، وعلى الجانب الآخر للأطلنطى عرضت «نيويورك تايمز» للاكتشاف فى ١٦ من يناير وأعقبت ذلك بتقارير أخرى فى شهر فبراير. ولأول مرة تأخرت المجلتان العلميتان نيتشر (Nature) وساينس (Science) وراء الصحافة الجماهيرية، ونشرتا ترجمات لبحث رونتجن فى ٢٣ من يناير و١٤ من فبراير على التوالى.

وفى فرنسا، نقلت «ليماتان» (Le Matin) الرواية فى ١٢ من يناير، وكانت أشعة إكس موضوع المناقشة الرئيس لاجتماع الأكاديمية الفرنسية للعلوم فى ٢٠ من يناير. وكان بيكريل حاضرًا الاجتماع، وعرف من زملائه أن رونتجن حدد هوية مصدر أشعة إكس ـ فقد صدرت من النقطة المضيئة فى جدار أنبوب التفريغ الزجاجى حيث تصطدم أشعة الكاثود، وتجعلها تتفلور. واستكمالاً للاهتمام العائلى بظاهرة التفسفر، قرر بيكريل على الفور إجراء تجارب لمعرفة ما إذا كانت أشعة إكس يمكن أن تنبعث من أجسام متفسفرة أخرى. وكان من بين البللورات التى حددها للاختبار بعض أملاح اليورانيوم، بما فى ذلك ملح ثنائى كبريتات يورانيل البوتاسيوم، الذى كان قد تم تحضيره قبل ذلك بخمسة عشر عامًا، أثناء عمله مع والده.

وسرعان ما وجد بيكريل التأثير الذى كان يبحث عنه. فلقد نشطت الأملاح المتفسفرة التى استخدمها عندما قام بتعريضها لضوء الشمس. وظلت تتوهج لفترة قصيرة قبل أن تبهت وتحتاج إلى مزيد من الشحن من أشعة الشمس. فقام بلف شريحة فوتوغرافية بين قطعتين من الورق الأسود السميك ووضع فوقها طَبقًا به المادة المفسفرة وعرضها لأشعة الشمس. وعند تحميض الشريحة، وجد أن المحيط الخارجى للمادة المفسفرة قد ظهر على الشريحة، وعندما وضع عملة معدنية بين الطبق والشريحة الملفوفة وعرّض الجميع لأشعة الشمس، أوضحت الشريحة المحمضة صورة العملة المعدنية. واستنتج بيكريل، فى بحث قدمه إلى أكاديمية العلوم فى ٢٤ من فبراير ١٨٩٦ «أن أشعة تنبعث من المادة المفسفرة المعنية وتنفذ خلال ورق لا يُنّفذ الضوء».

وعند هذه المرحلة، كان الأمر يبدو وكأن النشاط التفسفرى الذى تم تحفيزه بأشعة الشمس، أنتج أشعة مماثلة لأشعة إكس ـ وربما تكون هى أشعة إكس نفسها. ولكن، بعد

ذلك بأسبوع واحد، عاد بيكريل إلى الأكاديمية ليقرر أن هذا التأثير لا علاقة له بأشعة الشمس ولا بظاهرة التفسفر. ففى الأيام الأخيرة من شهر فبراير ١٨٩٦، كان بيكريل قد أعد تجربة أخرى، وضع فيها قطعة من النحاس على شكل صليب بين طبق به أملاح يورانيوم وشريحة فوتوغرافية. ونظرًا لاحتجاب الشمس، حيث كانت سماء باريس ملبدة بالغيوم فى تلك الأيام، احتفظ بها فى خزانة لعدة أيام.

ثم قام فى يوم الأحد الموافق الأول من مارس، ربما لأنه مل الانتظار، بتحميض الشريحة، واندهش عندما وجد صورة واضحة وصافية، للصليب النحاس. ويبدو أن الأمر كان مفاجأة تامة له، إذ قال ابنه چان، الذى كان فى الثامنة عشرة من عمره حينذاك، وهو يتذكر فيما بعد ذلك اليوم، أن هنرى كان «مذهولاً» عندما «وجد أن الصورة الظلية كانت أكثر حِدَّة وشِدَّة من الصور الظلية التى حصل عليها فى الأسبوع السابق».

كان هناك بالطبع عنصر صدفة وحسن طالع فى ذلك الاكتشاف، حتى لو كان بيكريل يخطط، كعالم جيد، لكى يتحقق من «النتيجة الصفرية» التى كان يتوقعها، أى أن تكون الشريحة خالية، طالما أن الأملاح لم تتعرض لضوء الشمس. لقد شعر بيكريل نفسه أن ما حدث هو قدر، كما ذكر إبراهام بيز فى تأريخه لفيزياء الجُسيَمات. لقد اعتبر بيكريل ذلك تتويجًا لجهد ثلاثة أجيال من عائلته ظلوا يبحثون لمدة ستين عامًا فى ذات المعمل فى مجال ظاهرة التفسفر.

غير أن الأثر المباشر لأبحاث بيكريل لم يتعدَّ دائرة صغيرة من العلماء، على نقيض ما حدث لاكتشاف رونتجن. ربما بدا الاكتشاف شديد الشبه بأشعة إكس بالنسبة للصحافة الجماهيرية التى لم تتمكن من تمييز الفارق. لكن سرعان ما أدرك عدد قليل من الخبراء على الأقل ما يتضمنه الاكتشاف من دلالات عميقة. وأوضح بيكريل على الفور أن مصدر الإشعاع هو اليورانيوم ذاته، وهو كمعدن فى صورته النقية ليس متفسفرًا البتة. وكان يتساءل فى نهاية ١٨٩٦ عن مصدر طاقة هذا الإشعاع، طالما أنه لا يتوقف على ضوء الشمس.

وقد شكل هذا الاكتشاف لغزًا فريدًا، فمصدر الكهرباء فى حالة أشعة إكس واضح تمامًا، وهو الكهرباء المستخدمة فى أنبوب أشعة الكاثود. وبدا الأمر وكأن الطاقة الإشعاعية لليورانيوم شىء لا طائل منه. وفى عام ١٨٩٦، كتب بيكريل فى مجلة «كونت

رندو» (Comptes Rendus) أنه «لم يتمكن بعد من معرفة من أين يستمد اليورانيوم الطاقة التى يشعها بمثل هذه الاستمرارية». ولكنه بانتهاء ذلك العام، حول اهتمامه إلى موضوعات علمية أخرى، وإن كان قد نشر فى بعض الأحيان أبحاثًا قصيرة عن النشاط الإشعاعى. وتُرك الأمر لاثنين من الباحثين الشباب لمتابعة اكتشافه وحمل ما ينطوى عليه من دلالات إلى القرن العشرين.

الطاقة من الذرات

قصة مارى كورى وأبحاثها مع زوجها بيير فى تنقية المواد المشعة وتحديد هويتها معروفة للجميع. ولن أتحدث هنا عن أية تفاصيل. وُلدت مارى فى بولندا عام ١٨٦٧، وانتقلت إلى باريس عام ١٨٩١ وتزوجت بيير عامَ ١٨٩٥. وفى أعقاب اكتشاف بيكريل للنشاط الإشعاعى، قامت بتحليل العديد من الفلزَّات والأملاح والأكاسيد والمعادن، ووجدت أن ظاهرة النشاط الإشعاعى، وإن كانت نادرة، لا تحدث فى اليورانيوم وحده. وأثبتت أن كمية النشاط الإشعاعى فى عينة تحتوى على اليورانيوم تتوقف على كمية اليورانيوم فى تلك العينة، وفى عام ١٨٩٨ حددت هوية عنصرى البولونيوم والراديوم، وهما عنصران مشعان كانا مجهولين قبل ذلك. وقد أدت هذه الاكتشافات إلى مشاركة مارى وبيير كورى لبيكريل فى جائزة نوبل للفيزياء عام ١٩٠٣؛ تقديرًا لأعمالهم الرائدة فى مجال النشاط الإشعاعى.

كما كان لأبحاثهما عواقب مأساوية أيضًا. ففى ذلك الوقت، لم تكن أخطار النشاط الإشعاعى معروفة، وكانت الظروف التى يعملان فى ظلها لا تصلح للعمل فى أى معمل حديث. لا زالت مفكرة مارى كورى مشعة حتى الآن منذ التسعينيات من القرن التاسع عشر نتيجة تلوثها بالمواد التى كانت تستخدمها، بحيث يُعتبر لمسها خطيرًا حتى فى الوقت الحالى. ولقد عانى كل من بيير ومارى كورى مما يُعرف حاليًا بمرض الإشعاع. وساهم ذلك فى وفاة مارى عام ١٩٣٤، ومن المحتمل أن يكون قد ساهم أيضًا فى وفاة بيير بشكل غير مباشر عام ١٩٠٦؛ حيث إنه بعد فترة من المرض زلت قدمه أثناء عبوره الطريق وسقط تحت عجلات عربة تجرها الخيول.

وفى عام ١٩١١، حصلت مارى على جائزة نوبل للمرة الثانية، وكانت هذه المرة فى الكيمياء، عن أبحاثها على الراديوم. ولا شك أن بيير كان سيشاركها الجائزة لو كان حيًا، فقد أكدت مارى فى خطاب تسلمُّها الجائزة، أنه بالرغم من أنها قامت بالبحث

الكيميائى الذى أدى إلى عزل الراديوم كملح نقى، فإن ذلك كان مرتبطًا بشكل أساسى وجوهرى ببحثهما المشترك فى مجال النشاط الإشعاعى.

غير أن ما قدمته مارى كورى قد تم تجاوزه حاليًا فيما يتعلق بحل أسرار الشمس. وكان پيير كورى قد قاس فى عام ١٩٠٣، مع مساعده ألبير لابورد (Albert Laborde)، كمية الحرارة التى يولدها نشاط الراديوم. وفى العام نفسه شارك الفيزيائى الشاب أرنست راذرفورد (Ernest Rutherford) القادم من نيوزيلندا فى أبحاث قياس الحرارة التى ينتجها الراديوم. وكان راذرفورد قد بدأ يبحث فى تركيب الذرة، وفى استنباط قواعد الانحلال الإشعاعى.

ولد راذرفورد فى نيوزيلندا عام ١٨٧١. وفى عام ١٨٩٥، أصبح أول خريج فى جامعة أخرى (كلية كانتربورى فى نيوزيلندا) يتم قبوله كباحث فى جامعة كامبريدج، وذلك بموجب قانون جديد بدأ تنفيذه آنذاك. وهناك، عمل فى معمل كافنديش (Cavendish Laboratory) تحت رئاسة ج.ج. طومسون (J.J. Thomson) الذى كان على وشك اكتشاف أن أشعة الكاثود هى فى الواقع جسيمات (تُسمى الآن إلكترونات). وتم إعلان اكتشاف طومسون فى أبريل ١٨٩٧، وبذلك تم تقديم أول دليل على أن الذرة قابلة للانقسام. إن الإلكترونات ـ التى تحمل شحنة كهربية سالبة ـ أصغر بكثير من الذرات، وأصبح واضحًا من أبحاث طومسون وعلماء آخرين فى ذلك الوقت، أن الإلكترونات هى حرفيًا ـ أجزاء يمكن فصلها عن الذرات. ومع أنباء أبحاث بيكريل الواردة من پاريس، عجب فى أن يحول راذرفورد، الذى يعمل فى معمل طومسون، اهتمامه إلى دراسة عمليات الذرية. وفى عام ١٨٩٨، حصل على منصب فى جامعة مكچيل (Mcgill) فى دا وذلك نتيجة لوضعه المتميز كباحث فى كامبريدج. وفى عام ١٩٠٧، أصبح أستاذًا للفيزياء فى جامعة مانشستر بإنجلترا، وفى عام ١٩١٩ خلف طومسون كمدير لمعمل كافنديش. وبالرغم من أنه لم يعمل قط فى مجال الفيزياء الفلكية مباشرة، فإن أعماله الرائدة فى مجال النشاط الإشعاعى ساعدت بشكل رئيس فى الكشف عن أسرار الشمس.

وقد أثار اكتشاف أشعة إكس والإلكترون وإشعاع بيكريل، اهتمام الباحث الشاب الذى عمل فى كامبريدج من عام ١٨٩٥ إلى عام ١٨٩٨. وأثبت راذرفورد، فى مجموعة من الأبحاث، أن الإشعاع الذى اكتشفه بيكريل هو خليط من نوعين من الأشعة،

وأسماهما: أشعة ألفا وأشعة بيتا. وبحلول عام ١٩٠٢، نجح باحثان آخران فى إثبات أن أشعة بيتا هى فى الواقع إلكترونات سريعة الحركة. وركز رازرفورد جهوده على أشعة ألفا، وبعد مجموعة طويلة من التجارب، تخللتها فترات من أبحاث أخرى، تمكن من أن يثبت أولاً أن أشعة ألفا هى أيضًا تيارات من الجسيمات، وفى عام ١٩٠٨ أثبت أن كل جسيم ألفا له كتلة تكافئ تقريبًا كتلة أربع ذرات هيدروچين، لكنه يحمل وحدتين فقط من الشحنة الموجبة. ومن ثَم، استنتج أن جُسيم ألفا لا بد أن يكون مثل ذرَّة هليوم فقدت اثنين من إلكتروناتها. وفسر هذا الاستنتاج بشكل مُحْكم اكتشاف آثار من غاز الهليوم فى المعادن التى تحتوى على يورانيوم، وهو ما كان يمثل لغزًا فى عام ١٨٩٥. وكان العالم البريطانى چوزيف لوكيير (Joseph Lockyer)، رائد استخدام التحليل الطيفى فى دراسة الشمس، هو أول من حدد هوية عنصر الهليوم فى عام ١٨٦٨، مستخدمًا هذه التقنية التى تعتمد على تحديد هوية العناصر بواسطة نماذج من الخطوط المميزة التى تُحدثها تلك العناصر فى ألوان الطيف، تمامًا كما تميز بصمة الأصابع إنسانًاعن آخر. وعندما عثر لوكيير فى ضوء الشمس على خطوط طيفية لا تنتمى إلى أى عنصر معروف، افترض أنها قد نتجت عن عنصر غير موجود إلا فى الشمس فقط، ومن ثَم أطلق عليه اسم هليوم نسبة إلى اسم إله الشمس الإغريقى هليوس. ولم يتوقع أحد العثور على الهليوم على الأرض. غير أن أبحاث رازرفورد أوضحت كيف أن النشاط الإشعاعى يؤدى إلى تكوين جسيمات ألفا التى تكتسب كل منها إلكترونين من البيئة المحيطة بها لتعطى ذرات هليوم.

كما فسر رازرفورد أيضًا، فى أبحاثه المشتركة مع فريدريك سودى (Frederick Soddy) فى كندا، كيف يكون النشاط الإشعاعى مصحوبًا بتفكك الذرات، حيث تتحول ذرات العنصر المشع إلى ذرات عنصر آخر. وأثبت أن نصف الذرات فى عينة العنصر المشع ستتحلُّ بهذه الطريقة فى وقت محدد، مميز للعنصر المشع، يُسمى حاليًا العمر النصفى للعنصر المشع. وهو ما يمثل نمطًا غريبًا جدًا للسلوك. فعلى سبيل المثال، تنحل نصف الذرات فى عينة الراديوم خلال ١٦٠٢ عام، وتتحول إلى ذرات غاز الرادون حيث تنبعث جسيمات ألفا وبيتا. وفى السنوات الألف والستمائة والاثنتين التالية تنحل نصف الكمية المتبقية من الراديوم (ربع الكمية الأصلية)، وهكذا دواليك. كيف «تعرف» ذرة بعينها أنه يتعين عليها أن تنحل، ومتى؟ لم تتوافر إجابات عن هذه الأسئلة إلا فى العشرينيات من القرن العشرين، عندما تم تطوير نظرية الكَمّ للسلوك الذرى.

وفى غضون ذلك، سرعان ما انتقل راذرفورد من مجرد دراسة جسيمات ألفا إلى استخدامها لدراسة الذرة. كما شجع هانز جيجر (Hanz geiger) وأرنست مارسدن (Ernest Marsden) فى مانشستر، على دراسة الطريقة التى تتفرق بها جسيمات ألفا عند اصطدامها برقاقة من الذهب، واكتشفا أن أغلب جسيمات ألفا فى الشعاع تمر مستقيمة خلال الرقاقة كما لو لم تكن موجودة، غير أن عددًا قليلاً جدًا من الجسيمات ترتد وكأنها اصطدمت بشىء صلب. وكانت هذه الأبحاث هى التى برهنت على أن الذرات تتكون من أنوية صغيرة جدًا وذات كثافة، تحمل شحنة كهربية موجبة، وتحيط بها سحابات رقيقة من الإلكترونات. يستطيع جسيم ألفا السريع الحركة (الذى تحددت هويته الآن كنواة هليوم) المرور خلال سحابة الإلكترونات مثل طلقة بندقية خلال نسيج ورقى، لكن إذا حدث واصطدم الجسيم مباشرة بالنواة، فإن الشحنة الموجبة للنواة تتنافر عندئذ مع الشحنة الموجبة لجسيم ألفا وتجعله يرتد من حيث أتى.

لم يكن حصول راذرفورد على جائزة نوبل عام ١٩٠٨ مثارًا للدهشة نظرًا لكل هذا النشاط العلمى الذى قام به. لكن المفاجأة أنه حصل عليها نتيجة «أبحاثه عن تحلّل العناصر وكيمياء المواد المشعة». ما المفاجأة فى ذلك؟ لأن راذرفورد لم يكرس إلا وقتًا قليلاً جدًا للكيمياء. أو بالأحرى، لم يكن لديه وقت لأى شىء آخر غير الفيزياء. ومع ذلك فقد قبل الجائزة عن طيب خاطر، وعلق فى الخطاب الذى ألقاه بعد مأدبة الغداء التى أُقيمت احتفالاً به يوم حصوله على الجائزة قائلاً: «تعاملت مع العديد من التحولات المختلفة ذات الفترات الزمنية المتنوعة، ولكن أسرع تحول صادفته هو تحولى أنا نفسى من عالِم فيزياء إلى عالم كيمياء». وسواء أكان كيميائيًا أم فيزيائيًا، فلقد قدم راذرفورد إسهامًا كبيرًا أيضًا لعلم الفلك، وذلك من خلال الفهم المتطور لمصادر طاقة الشمس، كما شارك فى حل اللغز الچيولوچى لعمر الأرض. ولاشك أنه كان سيعتبر ذلك، إثباتًا آخر بأن العلم أيًا كان إنما يخرج من عباءة الفيزياء.

حل أزمة الطاقة

استفاد راذرفورد من الأعمال الرائدة فى مجال النشاط الإشعاعى فى التسعينيات من القرن الماضى، لكن إسهاماته الرئيسة انطلقت مباشرة من أعمال كورى ولابورد. فعندما اكتُشفت الطاقة الإشعاعية فى أول الأمر، كان الباحثون أمثال هنرى بيكريل ومارى كورى، يعتقدون أن الطاقة التى تنطوى عليها هذه الطاقة تأتى من الخارج، من

مصدر ما من الطاقة الخارجية وتستطيع بعض العناصر أن تمتصها وتحولها إلى طاقة إشعاعية قابلة للرصد. لكنهم لم يقدّروا فى ذلك الوقت كَمّ الطاقة الكبير الذى ينطلق. وفى عام ١٩٠٠، أوضح بحث مشترك لرادزفورد ومككلنج (McClung) فى جامعة مكچيل، أن مختلف أنواع الأشعة تحمل بالفعل طاقة ضخمة ـ لكن هذا البحث لم يُحْدث تأثيرًا ملحوظًا.

الخطوة الرئيسة التالية قام بها اثنان من الباحثين الألمان، هما: چوليوس ألستر (Julius Elster)، وهانز جيتل (Hans Geitel). ففى عام ١٨٩٨، أثبت الباحثان الشابان أن مصدر الطاقة فى النشاط الإشعاعى قد لا تكون واردة من الخارج. فلقد وضعا مواد مشعة فى برطمانات مفرغة وزرعوها على عمق كبير تحت الأرض لوقايتها من تأثيرات أية طاقة من خارج كوكب الأرض، لكنهما وجدا أن النشاط الإشعاعى لهذه المواد لم يتضاءل. ومعنى ذلك أن الطاقة تأتى من الذرات نفسها. ولم يهتم أحد فى ذلك الوقت بهذه الأبحاث، مع أن الآراء اختلفت حول مصدر هذه الطاقة. ففى عام ١٨٩٩، ذكر رادزفورد أن مصدر طاقة النشاط الإشعاعى «لغز»، فى حين كان طومسون يفترض دائمًا أن الطاقة نتيجة عملية إعادة ترتيب داخلية لتركيب الذرة الذى لم يكن معروفًا بعد، ومثل أغلب علماء الفيزياء كان مهيئًا لترك هذه المسألة للأجيال القادمة لكى تكتشف كيفية حدوث ذلك.

وفى عام ١٩٠١، برهن ألستر وجيتل على أن هناك نشاطًا إشعاعيًا طبيعيًا حتى فى التربة والهواء، وعثر متحمسون آخرون على النشاط الإشعاعى فى كل مكان، فى الجليد والمطر والبحيرات والصخور. وأخيرًا، اكتُشف مصدر «جديد» للطاقة، مصدر يستطيع المحافظة على دفء الأرض، على الأقل، من الداخل لمدة أطول بكثير مما افترضته حسابات طومسون لكوكب يبرد بشكل مطّرد. وفى عام ١٩٠٣، ظهر أول افتراض بأن النشاط الإشعاعى مسئول، ولو جزئيًا، عن حرارة الشمس وحرارة كوكب الأرض، وذلك على يد چورج داروين بجامعة كامبريدچ وچون جولى بجامعة دبلن. وكان روبرت ستروت من الإمبريال كولدچ بلندن، سريعًا فى افتراضه أن وجود الراديوم والمواد المشعة الأخرى داخل الأرض يوفر مصدر حرارة يمكنه أن يمد المقياس الزمنى الچيولوچى بشكل لا نهائى. وإذا كان التطابق بين المقياس الزمنى لعمر الأرض وعمر الشمس الذى وضعه طومسون قد تحطم، فإن الوقت كان قد حان، بكل تأكيد، للبحث مرة أخرى عن كيفية حصول الشمس على طاقتها.

وكان المفتاح هو إدراك الكم الهائل من الطاقة التى تتضمنها عمليات النشاط الإشعاعى. لقد تجاهلت الأوساط العلمية أبحاث رادرفورد المشتركة مع مككلنج فى هذا الموضوع، لكن ما إن برهن رادرفورد وسُودى على أن النشاط الإشعاعى يتضمن تحول ذرات عنصر إلى ذرات عنصر آخر، بدا واضحًا أن «الانبعاث المستمر للطاقة من الأجسام النشطة ينبع من طاقة داخلية متأصلة فى الذرة»، كما قال رادرفورد فى الطبعة الأولى من كتابه «النشاط الإشعاعى». وفى ذلك الوقت، أى فى عام ١٩٠٣، كانت القياسات التى أجراها كورى ولابورد سببًا فى وضع لغز الطاقة المنبعثة من النشاط الإشعاعى ككل فى مقدمة علم الفيزياء من جديد، مبرهنة بشكل أكثر إثارة على ما سبق وأشار إليه رادرفورد ومككلنج فى عام ١٩٠٠.

وقبل حلول مارس ١٩٠٣، كان العلماء يعرفون أن هناك طاقةً ما تنبعث من عناصر مثل اليورانيوم والراديوم خلال نشاطها الإشعاعى، غير أن أغلب هؤلاء العلماء كانوا ينظرون إلى كمية هذه الطاقة على أنها صغيرة بحيث لا تستحق الانشغال بها كثيرًا. وبعد ذلك، قام كورى ولابورد بقياس الحرارة المنطلقة من جرام راديوم، ووجدا أن كمية الحرارة التى تنتج كل ساعة تكفى لتسخين ١،٣ جرامًا من الماء من درجة الصفر المئوى إلى درجة الغليان. بمعنى آخر، فإن الحرارة المتولدة من جرام الراديوم تكفى لانصهار هذا الراديوم الموضوع فى الثلج خلال ساعة. وأحدث ذلك رعبًا. إن انطلاق مثل هذه الطاقة الوافرة أمر لا يمكن التغاضى عنه وتركه للأجيال القادمة لكى تفسره، بل إن بعض الفيزيائيين توقعوا أن تكون عمليات النشاط الإشعاعى قد انتهكت قانون بقاء المادة، وهو القانون الأساسى لعلم الفيزياء. ومتجاهلاً أبحاث ألستر وجيتل، قال وليام طومسون، الذى أصبح لورد كلفن فى عام ١٩٠٤ الذى صادف بلوغه الثمانين من عمره، «إن الطاقة مستمدة من الخارج.. وإننى أغامر بأن أفترض أن موجات أثيرية ربما هى التى تمد الراديوم بالطاقة بطريقة ما».

وفى غضون ذلك، كان رادرفورد يُجْرى أبحاثه على هذه المشكلة فى كندا بالاشتراك مع هوارد بارنز (Howard Barnes)، الذى خلفه كأستاذ فى مكجيل بعد عودته إلى إنجلترا فى ١٩٠٧. وبعد ستة أشهر من أبحاث كورى ولابورد، تمكنا من إثبات أن كمية الحرارة الناتجة أثناء النشاط الإشعاعى تعتمد على عدد جسيمات ألفا المنبعثة من المادة. تنبعث هذه الجسيمات الثقيلة نسبيًا من الذرات المشعة (نحن نعلم الآن أنها

تنبعث من «الأنوية» المشعة) وتصطدم بذرات (أنوية) أخرى مجاورة لها، متخلية عن طاقتها الحركية فى شكل حرارة. وسرعان ما حول راذرفورد اكتشاف هذا المصدر الجديد للطاقة إلى قضية تحديد عمر الأرض. وقال بعد ذلك عند عرضه لهذه الأفكار على جمهور من العلماء فى المعهد الملكى فى لندن عام ١٩٠٤:

«دخلتُ الغرفة، التى كانت نصف مظلمة، واكتشفت على الفور وجود لورد كلفن وسط الحاضرين وأدركت أننى فى مأزق بالنسبة للجزء الأخير من الخطاب الذى يتناول عمر الأرض، حيث تتعارض رؤيتى مع رؤيته.. وحضرنى إلهام مفاجئ، وقلت إن لورد كلفن حدد عمر الأرض «شريطة ألا يتم اكتشاف مصدر جديد للحرارة». وهذه النبوءة تنطبق على ما نتدارسه الليلة، الراديوم! انظر! ها هو الرجل العجوز يبتسم لى بابتهاج».

لقد أدرك راذفورد أن النشاط الإشعاعى داخل الأرض يولد حرارة، وإن كان معدله لم يكن معروفًا حينذاك. وبالتالى لا يمكن اعتبار كوكب الأرض بعد ذلك جسمًا باردًا، كما أن المقياس الزمنى لعمر الأرض الذى وضعه كلفن قد لا يكون سوى الحد الأدنى للعمر المفترض. وقد استغرق الأمر عدة عقود لكى يقتنع المتشككون، وتقف الفكرة على قاعدة صلبة عقب تطور فيزياء الكم فى العشرينيات من القرن العشرين، لكن افتراض راذرفورد بأن باطن كوكب الأرض ظل ساخنًا ـ ساخنًا لدرجة الانصهار إلى وقتنا الراهن ـ نتيجة للنشاط الاشعاعى، أصبح راسخًا مثل أى شىء فى العلم. غير أن «سطح» كوكب الأرض ظل دافئًا حتى الآن نتيجة حرارة الشمس فى السماء، وليس نتيجة لكمية الحرارة الصغيرة جدًا نسبيًا التى تتسرب من باطن الأرض. كان واضحًا تمامًا، فى بداية القرن العشرين، على الأقل بالنسبة لبعض علماء الفيزياء ذوى البصيرة الثاقبة، أن النشاط الإشعاعى يحمل كذلك مفتاح فهم طاقة الشمس، لكن طرح هذه الرؤية على أسس علمية سليمة استغرق أكثر من عشرين عامًا، حيث كان الأمر يتطلب تطور فيزياء الكم. لكن على الأقل، خلال هذين العقدين، تحدد عمر كوكب الأرض بناءً على قواعد مؤكدة.

موعد مع النشاط الإشعاعى

أدرك راذرفورد وسودى أن النشاط الإشعاعى هو نتيجة تحول ذرات عنصر إلى ذرات عنصر آخر. وعندما تنبعث جسيمات ألفا وبيتا من ذرة (نواة)، فإن ما يتبقى هو نوع مختلف من الذرات (الأنوية). ومن أهم مميزات هذه العملية أنها تحدث بمعدل

منتظم. وكما سبق أن أشرت، فإن نصف الكمية بالضبط، من أية عينة من عنصر مشع، «تنحل» إلى ذرات مختلفة فى زمن محدد يُسمى العمر النصفى لهذا العنصر. لا يهم ما إذا كانت كمية العنصر المشع التى لديك كثيرة أو قليلة، فإن نصفها بالضبط يتحول إلى عنصر آخر خلال العمر النصفى له، ويتحول نصف ما تبقى أثناء عملية الانحلال الإشعاعى خلال العمر النصفى التالى، وهكذا.

إن كل عنصر مشع يُنَتِج، عندما ينحل، خليطًا مميزًا من العناصر هى نواتج الانحلال. وبينما يكون العمر الافتراضى لبعض العناصر المشعة قصيرًا للغاية، أجزاء من الثانية، بحيث لا تظهر هذه العناصر قط طبيعيًا على الأرض، فإن هناك عناصر أخرى مثل اليورانيوم والثوريوم والراديوم يكون عمرها النصفى طويلاً جدًا، فهذه العناصر لا تزال موجودة على الأرض بالرغم من تعرضها لعمليات الانحلال منذ نشوء النظام الشمسى.

وقد تنحل ذرات عنصر مشع إلى عنصر مستقر أو إلى عنصر مشع آخر. وإذا كان الناتج نفسه مشعًا، فإن العملية تتكرر إلى أن تتكون ذرات مستقرة. وبقياس نِسَب النواتج المميزة لعملية الانحلال فى الصخور حاليًا، وبمقارنة هذه النسب مع نسب العناصر المشعة الأصل مثل اليورانيوم، يستطيع الفيزيائيون المسلحون بمعرفة الأعمار النصفية المناسبة للمواد المشعة المختلفة أن يستدلوا على عمر الصخور. إن المهم ليس هو الكميات الحالية من كل عنصر، ولكن النسب ـ النسبة بين كميات العناصر المستقرة مثل الرصاص، وكميات العناصر غير المستقرة مثل اليورانيوم والثوريوم.

إن أسلوب تحديد عمر الصخور بواسطة النشاط الإشعاعى يعتمد على المعرفة التامة بطريقة انحلال العناصر المشعة، والعناصر الناتجة عن هذا الانحلال. وقد قام بهذا العمل الطليعى رادرفورد وبرترام بولتوود (Bertram Boltwood) فى العقد الأول من القرن العشرين. حيث اهتم بولتوود، وهو كيميائى أمريكى، بالمشكلة بعد أن سمع رادرفورد يلقى محاضرة فى يال عام ١٩٠٤ يعرض فيها أبحاثه فى مجال النشاط الإشعاعى.

فى ذلك الوقت، كان رادرفورد ما زال يشك فى أن جسيم ألفا يكافئ بالضبط ذرة هليوم انتُزع منها إلكترونان، لكنه تمكن فى عام ١٩٠٨ من أن يثبت ذلك. وفى عام ١٩٠٤، استطاع سودى زميل رادرفورد القديم، والذى كان يعمل فى ذلك الوقت مع سير

وليم رامساى (William Ramsay) بجامعة لندن، تحديد معدل إنتاج عينة راديوم لعنصر الهليوم - وكان رازدرفورد قد أدرك أن ذرات الهليوم تتكون نتيجة التقاط كل جسيم ألفا منبعث من انحلال الراديوم لاثنين من الإلكترونات من البيئة حولها لتصبح ذرات هليوم. وتمكن رازدرفورد، باستخدام معدل رامساى كدليل، من حساب عمر عينات من الصخور بقياس كمية الهليوم التى تحتويها هذه الصخور، مفترضًا أن كل ذرات الهليوم نتجت عن انحلال إشعاعى، وأن ذرة هليوم واحدة لم تهرب منذ تكوينها. وقدرت هذه الحسابات عمر قطعة صخر كانت لدى رازدرفورد بأربعين مليون عام. غير أن العمر الحقيقى للصخرة، بافتراض أن بعض غاز الهليوم قد تسرب عبر الدهور، أكبر من هذا الرقم دون شك.

لكن بولتوود استخدم هذه الخلاصة للوصول إلى مرحلة أبعد، فاحصًا كل نواتج الانحلال الإشعاعى وليس الهليوم وحده؛ حيث عرف فى عام ١٩٠٤ أن انحلال اليورانيوم ينتج راديوم وسرعة حدوث ذلك، وأثبت بعد عام أن انحلال الراديوم يعطى رصاصًا فى النهاية. ومع نهاية عام ١٩٠٥، كان بولتوود انتهى من حساب أعمار عينات مختلفة من الصخور والتى كانت تتراوح بين ٩٢ مليون عام و٥٧٠ مليون عام، واستخدم فى حسابه قياسات تتضمن سلسلة يورانيوم - راديوم - رصاص. لكن كل هذه الأرقام كانت خاطئة للأسف. والسبب فى ذلك أنها اعتمدت على قياسات لرازدرفورد، اتضح فيما بعد عدم دقتها، وعلى العمر النصفى للراديوم الذى سرعان ما تمت مراجعته على ضوء دراسات لاحقة.

ومع ذلك، وضع رازدرفورد وبولتوود أقدامهما على المسار الصحيح مع بداية عام ١٩٠٧. صحيح أن الأرقام التى توصلا إليها لم تكن فى دقة التقديرات الحديثة؛ ولكنها كانت كافية لإثبات وقوع خطأ جسيم فى تقديرات طومسون لعمر الأرض. وأعطت التقديرات الجديدة (التى تضمنت، من بين مشكلات صغيرة أخرى، قياس آثار للراديوم تصل إلى ٣٨٠ جزءًا فى المليار، مقارنة باليورانيوم، فى عينات الصخور) أعمارًا لصخور مختلفة تتراوح بين ٤٠٠ مليون عام وأكثر من مليارَىْ عام. وحتى مع التسليم بوجود بعض القصور المتبقى فيما يتعلق بدقة التقنيات المستخدمة، فإنهما أثبتا أن عمر الأرض يُقدر بحوالى مليار عام - أى حوالى عشرة أضعاف تقدير طومسون لعمر الأرض على الأقل.

لكن هذا لم يكن كافيًا لإقناع المجتمع الچيولوچى بأخذ هذه التقديرات مأخذ الجد؛ إذ كانت التقنيات المستخدمة صعبة ومملة، ويبدو أن أحدًا لم يهتم بمحاولة إعادة القياسات ومراجعتها بشكل مباشر. وحتى بعد أن ظهرت التقديرات الجديدة لعمر الأرض، استمر العديد من الچيولوچيين يجادلون بأن التسخين الإشعاعى لا يكفى لإطالة عمر الأرض كثيرًا، وظل تقدير طومسون لعمر الأرض مقبولاً بشكل واسع.

اهتم بولتوود بأبحاث أخرى، ولم يول رازرفورد عمر الأرض بعد ذلك سوى اهتمام عابر، وتُركت القضية للجيل التالى ممثلاً فى آرثر هولمز (Arthur Holmes)، الذى حقق القبول العام للتقنية الإشعاعية فى تحديد عمر الصخور، وبالتالى الأرض.

ولد هولمز فى عام ١٨٩٠ ودرس فى الإمبريال كولدج بلندن، وعاد إليها مرة أخرى للقيام بأبحاث بعد بعثة إلى موزمبيق عام ١٩١١. ثم ذهب إلى بورما فى عام ١٩٢٠ ليعمل كچيولوچى بترول، وعاد إلى إنجلترا عام ١٩٢٥ ليصبح أستاذًا لعلم الچيولوچيا بجامعة دورهام، حيث كان من الأنصار الأوائل لفكرة الانجراف القارى. وانتقل عام ١٩٤٣ إلى جامعة إدينبرج، وكتب كتابًا لا يزال يُعتبر مرجعًا حتى الآن وهو «مبادئ الچيولوچيا الفيزيائية»، وتُوفّى هولمز عام ١٩٦٥.

وخلال فترة وجوده فى الإمبريال كولدج، حدد هولمز عمر العديد من عينات الصخور مستخدمًا طريقة يورانيوم ـ رصاص، وقرر أن عمر أقدم هذه الصخور ١،٦ مليار عام. وفى عام ١٩١٣، كان هولمز أول شخص يستخدم التقنية الإشعاعية لتحديد عمر الحفريات، ويضع لأول مرة تواريخ دقيقة فى سجل الحفريات. كما قام، قبل الحرب العالمية الأولى وبعدها، بتنقيح التقنية الإشعاعية وصقلها لتحديد عمر الصخور، آخذًا فى الاعتبار الاكتشاف الجديد القائل بأن العناصر قد تتخذ صورًا مختلفة (النظائر) تختلف أوزانها الذرية اختلافًا طفيفًا، وأنشأ مجموعة كبيرة من البيانات لدرجة أنها أجبرت حتى المتشككين، على الإقرار بأن التقنية الإشعاعية لتحديد عمر الصخور كشفت عن شىء مهم فيما يتعلق بعمر كوكب الأرض.

ومع بداية عام ١٩٢١، أوضحت مناقشة فى الاجتماع السنوى للجمعية البريطانية لتقدم العلم ظهور إجماع جديد: فقد أقر علماء الچيولوچيا والنبات والحيوان والفيزياء أن عمر الأرض بالفعل يصل إلى عدة مليارات من السنوات، وأن التقنية الإشعاعية هى أفضل مرشد لتحديد عمرها. وفى عام ١٩٢٦، جاء التصديق الأخير على ذلك، فى

شكل تقرير صدر عن المجلس القومى للبحوث التابع للأكاديمية القومية للعلوم فى الولايات المتحدة ليقر هذا التكنيك. وأجريت منذ ذلك الحين تنقيحات إضافية حددت عمر أقدم صخور وجدت على سطح الأرض بـ ٣،٨ مليار عام، أما أقدم عينات صخرية من نيازك سقطت على الأرض من الفضاء، فإن عمرها ٤،٥ مليار عام، وأصبح مقبولاً الآن بشكل واسع أن النظام الشمسى، بما فى ذلك الشمس والأرض، قد تكوَّن منذ حوالى ٤،٥ مليار عام.

وفى العشرينيات من القرن العشرين، بدأ أخيرًا تحقيق تقدم حقيقى فى البحث عن مصدر طاقة الشمس. ففى اجتماع الجمعية البريطانية عام ١٩٢٠، الذى سبق الاجتماع الذى أقنع فيه هولمز زملاءه أخيرًا بأنه يدرك تمامًا حقيقة أقواله، اتضحت معالم الطريق بشكل لا ريب فيه. ولمعرفة سبب ذلك علينا أن نرجع قليلاً إلى عام ١٩٠٣، والضجة التى أثارتها أبحاث كورى ولابورد عن الحرارة المنبعثة من الراديوم.

الطاقة النووية

أوضح إناء قهوة جامو تمامًا مدى ضعف الحرارة التى ينتجها فى المتوسط كل جرام من الشمس، ولكن التجربة التى أجراها كورى ولابورد أوضحت مدى ضخامة الحرارة التى ينتجها جرام من الراديوم. وفى يوليو ١٩٠٣، أى بعد إعلان نتائج بحوثهما بأربعة أشهر، نشرت مجلة نيتشر (Nature) فرضية لعالم الفلك البريطانى وليم ويلسون تقول بأن الراديوم هو المصدر المحتمل لحرارة الشمس. إذ أثبت أن ٣،٦ جرامًا فقط من الراديوم لكل متر مكعب من حجم الشمس، تكفى لتوفير كل كمية الحرارة التى تشع حاليًا من سطح الشمس.

لكن هذا الافتراض الذى طرحه ويلسون أخفق فى أن يُحْدث انطباعًا قويًا فى الدوائر العلمية. غير أن چورچ دارون (ابن تشارلز دارون) تناول الموضوع بعد ذلك ببضعة شهور، ولا غرابة فى ذلك، لأن چورچ دارون تشكَّك طويلاً فى الجدول الكرونولوچى الذى وضعه كلڤن للشمس والأرض، والذى كان يتناقض بشكل فاضح مع متطلبات نظرية النشوء. وعرض دارون الابن فى مجلة نيتشر أيضًا وجهات نظره فى النشاط الإشعاعى كمصدر لطاقة الشمس، لكنه كان معتدلاً تمامًا فيما يدعيه، مفترضًا أنه يتعين ضرب المقياس الزمنى لكلڤن فى عشرة أو عشرين ضعفًا فقط. وأثار ارتباط

اسم دارون بهذا الفرض اهتمامًا كبيرًا على الفور، أعاد إلى الأذهان الجدل الكبير بين كلفن وأنصار نظرية النشوء فى القرن التاسع عشر، وتدفقت الخطابات على مجلة نيتشر. وبنهاية عام ١٩٠٣، ساد اعتقاد قوى بأن حرارة الشمس تنبع أساسًا من الطاقة الإشعاعية. لكن حتى الباحثين المؤمنين بهذا الرأى كانوا يعرفون أنه مبنىٌّ بالكامل على التخمين، وأن العمليات الفعلية التى يتم من خلالها تحرير الطاقة من الذرات داخل الشمس لم تُعرف بعد. كانت الادعاءات سابقة لأوانها بشكل ما، وفى غياب نظرية راسخة لإنتاج الطاقة الشمسية بأية طرق أخرى، ظلت فرضيات كلفن الخاصة بالانكماش وبالمقياس الزمنى القصير باقية. واستمر الدفاع عن هذه الفرضيات بعد ذلك حتى بعشر سنوات.

كان الاعتراض الرئيس على فكرة أن الطاقة الإشعاعية هى التى تمد الشمس بالطاقة هو أن التحليل الطيفى لضوء الشمس، لم يبين أى أثر «للبصمات» المميزة لعناصر مثل اليورانيوم والراديوم. لكن رازرفورد كتب فى ذلك الوقت أكثر التعليقات التى تميزت بنفاذ البصيرة، حيث افترض فى عام ١٩١٣ أنه «يبدو ممكنًا، فى ظل الحرارة الهائلة للشمس، أن تحدث عملية تحول فى عناصر عادية مثل تلك التى رُصدت فى العناصر المشعة المعروفة»، ويواصل قائلاً: «إن الشمس قد تستمر فى أن تشع حرارة بالمعدل الحالى لمدة أطول بكثير عن المدة التى تم حسابها اعتمادًا على بيانات ديناميكية عادية».

فى ذلك الوقت، كان رازرفورد يعرف من أبحاث ألبرت آينشتاين أن المادة والطاقة قابلتان للتبادل من خلال العلاقة التالية:

الطاقة = الكتلة × مربع السرعة. والسرعة هنا هى سرعة الضوء، وهو ما كان يجهله كل من ويلسون ودارون قبل ذلك بعشر سنوات. وكان أول بحث لآينشتاين فى النسبية الخاصة الذى أثبت فيه، بين أشياء أخرى، العلاقة بين الكتلة والطاقة، قد نُشر فى عام ١٩٠٥. وفى العام نفسه، تناول فى بحث آخر موضوع الطاقة الإشعاعية حيث قال: «إذا أطلق جسم طاقة L فى شكل إشعاع، فإن كتلته تقل بمقدار L/C^2. وقرر بشكل قاطع أن «كتلة الجسم هى مقياس لطاقته»، وافترض أنه «ليس مستحيلاً مع أجسام طاقتها متغيرة لدرجة عالية (مثل أملاح الراديوم) وضع النظرية بنجاح موضع الاختبار».

كان آينشتاين شديد التفاؤل، إلى حد بعيد، فى أمله أن يتمكن أحد من قياس النقص فى كتلة مادة مشعة أثناء انطلاق الطاقة منها. لقد اعتدنا قياس تدفق الطاقة فى حياتنا اليومية بالوات أو الكيلووات. إن مصباحا كهربائيًا قوته الكهربائية مائة وات يشع طاقة تُقدر بمائة چول كل ثانية، بينما تقول لنا معادلة آينشتاين إنه يمكننا أيضًا قياس هذا التدفق الناتج عن كتلة مادة لا تزيد عن (١٠)$^{-١٢}$ جرام (أى علامة عشرية يليها ١٢ صفرًا ثم جرام واحد). إن سخانًا قوته الكهربية مائة وات يمكنه أن يرفع درجة حرارة جرام واحد من الماء من الصفر المئوى إلى درجة الغليان فى غضون أربع ثوانٍ، أى بسرعة أكبر بكثير من الحرارة المنتجَة من جرام راديوم، وبالتالى لا أمل فى قياس التغير فى كتلة الراديوم أثناء فَقْده للطاقة الإشعاعية بأى مقياس معقول للزمن.

وبناء على ذلك، يمكن اعتبار أن كتلة الشمس، التى تُكتب عادة ٢×(١٠)^{٣٣} جرام، تكافئ حوالى ٢× (١٠)^{٤٧} چول، أو حوالى ٥ × (١٠)^{٤٦} سُعْر بالوحدات التى استخدمها جامو. ومع انبعاث ٨،٨ × (١٠)^{٢٥} سعر من الحرارة من الشمس كل ثانية يظل لديها عمر محتمل يُقدر بحوالى ٦ × (١٠)^{٢٠} ثانية، أى ٢ × (١٠)^{١٢} عامًا (٢٠ تريليون عامًا)، وذلك حتى إذا كان ١٠٪ فقط من كتلتها هو الذى يمكن أن يتحول إلى طاقة حرارية. إن الشمس تشع طاقة تكافئ أربعة ملايين طن من المادة كل ثانية ـ لكن حتى لو كان ذلك مستمرًا منذ أربعة مليارات من الأعوام، فإن كمية المادة «المفقودة» بهذه الطريقة لا تمثل سوى واحد على خمسة آلاف من كتلتها الأصلية. إن «الطاقة الذرية» تستطيع بالطبع أن تحل لغز الطاقة الشمسية، وتعطى المقياس الزمنى الذى يتطلبه التطور. لكن كيف يتم ذلك؟

إن الذى قام بالخطوة التالية نحو فهم مراكز الطاقة الهائلة فى الشمس والنجوم، هو العالم البريطانى الرائد آرثر إدينجتون (Arthur Eddington)، الذى كان أول من طبق بنجاح القوانين الأساسية للفيزياء فى معالجة ما يحدث «داخل» النجوم، وكان بذلك مبتكر موضوع علم الفيزياء الفلكية.

ولد إدينجتون فى عام ١٨٨٢، وفى عام ١٩٢٠ أصبح أستاذًا لعلم الفلك بجامعة كامبريدج. وكان أيضًا من أشهر علماء ذلك الوقت، منذ أن كان مسئولاً عن تنظيم فريق العمل المعنىّ بقياس طريقة تأثير الشمس على انحناء ضوء النجوم، خلال كسوف الشمس الذى حدث عام ١٩١٩، كما أكد ما تنطوى عليه نظرية النسبية العامة

لآينشتاين من نبوءة ـ ومن المقولات الشائعة فى ذلك الوقت أن إدينجتون هو الشخص الوحيد(*)، بالإضافة إلى آينشتاين، الذى فهم فعلاً نظرية النسبية العامة. ومع ذلك فلقد وجد الوقت للقيام بأعمال كثيرة إلى جانب ذلك، وخلال العشرينيات من القرن العشرين افترض، عدة مرات، أن مصدر الطاقة فى الشمس قد يكون الفناء الكامل للمادة من أجل انطلاق الطاقة، أو انحلال العناصر الثقيلة عن طريق الانحلال الإشعاعى (الذى يُسمى حالياً انشطارًا)، أو تكوُّن عناصر ثقيلة من عناصر خفيفة، وهى العملية التى نسميها حاليًا (الاندماج)(**).

ففى عام ١٩٢٦ قال إدينجتون فى كتابه «التكوين الداخلى للنجوم»: «إن فناء البروتونات والإلكترونات، أو انحلال عناصر غير معروفة وذات نشاط إشعاعى مكثف هى مجرد افتراضات، لأن هذه العمليات يمكن أن تحدث أو لا تحدث. لكن تكوين الهليوم عملية «لا بد» أنها وقعت فى زمن ومكان ما ـ وأين يُحتمل أن يحدث ذلك إلا فى النجوم؟ لماذا أشار إدينجتون إلى تكوين الهليوم، وليس إلى أى عنصر آخر؟ السبب فى ذلك ما اكتشفه فرانسيس أستون (Francis Aston) الذى كان يعمل فى معمل كافنديش بجامعة كامبريدج.

كان أستون قد طور أداة، سُميت مَرْسَمة الطيف الكتلى (السبكتوجراف)، تستطيع تحديد الكتل الذرية لما يختاره من عناصر. وتعتمد هذه التقنية، التى لا زالت مستخدمة حتى الآن، على قياس طريقة انحراف الأيونات الموجبة (وهى ذرات فقدت إلكترونًا أو أكثر) عند تعرُّضها لمجال مغناطيسى. ويتوقف الانحراف على سرعة الجسيمات

(*) إحقاقًا للحق فإن العالم المصرى الكبير د. على مصطفى مشرفة الذى كان أصغر عالم يحصل على الأستاذية من جامعة القاهرة رغم أنه لم يكمل الثلاثين من عمره كان أول عالم فيزيائى يوضح العلاقة بين المادة والإشعاع ويضع مقاييس للقياس فى الفراغ. ورثاه آنيشتين نفسه قائلاً «إن وفاته خسارة للعالم أجمع» وتذكر المراجع الأمريكية أنه أحد سبعة علماء يعرفون دقائق تفتت الذرة وكان آنيشتاين يتابع أبحاثه بنفسه ومن تلميذاته النابغة المصرية سميرة موسى التى عرفت فى الغرب باسم ميس كورى المصرية (المراجع).

(**) يمكن لكل من الانشطار والاندماج أن يُنتجا طاقة، ويحدث ذلك، كما نعرف الآن، لأن أنوية الذرات فى المدى المتوسط للكتل هى أكثر الصور استقرارًا وأقلها طاقة. والسبب يرجع إلى تنصيلات نظرية الكم التى لا مجال للخوض فيها هنا. لكن أشد الأنوية استقرارًا هى نواة عنصر الحديد ـ ٥٦، وبلغة الطاقة نقول إن جميع الأنوية الأخرى تميل إلى التحول إلى هذه الحالة الثابتة سواء بالانشطار كما فى حالة الذرات الثقيلة كاليورانيوم، أو بالاندماج كما فى حالة الذرات الأخف مثل الكربون أو الأكسچين أو الهيدروچين. ومن المقارنات الشائعة فى هذا الشأن أن ننظر إلى الحديد وكأنه قاع لوادى الطاقة الذى تترتب على أحد جانبيه الذرات الخفيفة، وعلى الجانب الآخر الذرات الثقيلة. وبفرض توافر الظروف المناسبة ـ وهذا ما يوفره باطن أى نجم ـ فإن الأنوية الأخرى تتحرك لأسفل الوادى إلى أدنى نقطة فيه التى يمثلها الحديد.

وشحنتها وكتلتها. ونظرًا للأهمية الكبيرة لهذه التقنية وفوائدها الجمَّة، فقد حصل عنها أستون على جائزة نوبل فى عام ١٩٢٢. وكان أستون قد قام بتشغيل أول مرسمة طيف كتلى فى عام ١٩١٩، واكتشف بواسطتها أن كتلة ذرة الهليوم أقل بنسبة ٠،٨ ٪ من كتلة أربع ذرات هيدروچين. واكتشف أوزانًا ذرية أخرى تعادل «تقريبًا»، وليس بالضبط، مضاعفات الوزن الذرى للهيدروچين. وكان «عدم التساوى» التام هذا بمثابة المفتاح لإدينجتون ليحل لغزًا اقترب أوان حله بعد أكثر من قرن مضى.

كان الكيميائى الإنجليزى وليم پروت (William Prout) قد افترض، فى عام ١٨١٦، أن الوزن الذرى لأية ذرة هو المضاعف الدقيق للوزن الذرى للهيدروچين، غير أن بحثًا لاحقًا أثبت للكيميائيين أن القاعدة لا تنطبق بدقة، حيث إن الأوزان التى حددوها للذرات الأخرى تقارب بدرجة كبيرة المضاعفات الكاملة لوزن ذرة الهيدروچين.

الأمر المحير: لماذا ظل هذا الوضع قائمًا على امتداد القرن التاسع عشر ووصولاً إلى القرن العشرين. لا يستطيع الكيميائيون قياس الأوزان الذرية إلا بدراسة سلوك عدد كبير من الذرات فى التفاعلات الكيميائية، وأن يقارنوا، مثلاً، وزن الأكسچين الداخل فى التفاعلات مع وزن معين من الكربون أو الهيدروچين. ولا بد أن يكون ما يحصلون عليه من أوزان هو دائمًا متوسط أوزان جميع الذرات المشاركة فى التفاعلات. وفى عام ١٩١٢، قام فريدريك سودى، الذى عمل مع راذرفورد فى كندا بتفسير هذا التناقض، وكان يعمل آنذاك بجامعة جلاسجو، حيث أدخل فكرة النظائر، وهى ذرات «لنفس» العنصر الكيميائى لكنها تختلف اختلافًا طفيفًا فى أوازنها الذرية. فإذا احتوت عينة لعنصر ما على خليط من الذرات المختلفة قليلاً فى أوزانها الذرية والمتطابقة من حيث خواصها الكيميائية، فإن التجارب ستشير إلى «وزن ذرى» وحيد، قد يكون فى هذه الحالة متوسط الأوزان الذرية الفعلية، وبالتالى لن يكون بالضرورة مضاعفًا دقيقًا للوزن الذرى للهيدروچين، حتى وإن كان وزن كل نظير على حدة يساوى مضاعفًا دقيقًا للوزن الذى للهيدروچين. ولقد عالجت مرسمة سودى للطيف عددًا كبيرًا من الذرات، ووجدت أن ذرات كل نظير، رغم تَساويها فى الشحنة والسرعة، فإن درجة انحرافها فى المجال المغناطيسى تكون مختلفة، بحيث تظهر مستقلة. واستطاع سودى قياس الوزن الذرى لكل نظير، وحساب متوسط الأوزان الذرية للنظائر للحصول على «الأوزان الذرية» بالضبط التى تحددها التجارب الكيميائية.

لم يكن لدى سودى، فى ذلك الوقت، الصورة الكاملة للنظائر، إذ لم يكن يعرف كيف يمكن أن يكون لذرتين وزن ذرى مختلف وخواص كيميائية متماثلة. لم يتسن فهم ذلك إلا فى عام ١٩٣٢، عندما اكتشف چيمس شادويك (James Chaduick) النيوترون، وهو جسيم يماثل البروتون لدرجة كبيرة جداً لكنه لا يحمل شحنة كهربية. إننا نعلم الآن أن هناك مثلاً نظيرين للهليوم، الهليوم ـ ٣ النادر، الذى يحتوى فى نواة ذرته على ٢ بروتون ونيوترون واحد، والهليوم ـ ٤ العادى، الذى تضم نواة ذرته ٢ بروتون و٢ نيوترون (نواة ذرة الهليوم ـ ٤ هى جسيم ألفا). لم يكن إدينجتون فى عام ١٩٢٠ يعلم شيئًا عن النيترونات، وكان يعتبر ما نعرفه الآن على أنه بروتون هو ببساطة نواة ذرة الهيدروچين. لكنه، مثل معاصريه، كان يقدر تمامًا ما أكدته أبحاث سودى مرة أخرى لفكرة اعتبار كافة كل الذرات، مضاعفات لذرة الهيدروچين(*)، وربما تكونت بالتصاق ذرات الهيدروچين، بشكل ما، معًا. وأبدى إدينجتون على الفور اهتمامًا كبيرًا باكتشاف أستون القائل بأن وزن نواة ذرة هليوم ـ ٤ «أقل» من مجموع أوزان أربع أنوية هيدروچين «وُزنت» كل على حدة.

الطاقة الشمسية

فى أغسطس ١٩٢٠، عقدت الجمعية البريطانية لتقدم العلم اجتماعها السنوى فى كارديف. واختار إدينجتون أن يتحدث إلى الحاضرين فى موضوع الطاقة الشمسية، وبدأ بدق بعض المسامير فى نعش فرضية الانكماش:

«إن جمود التقاليد وحده هو الذى أبقى فرضية الانكماش على قيد الحياة ـ أو بالأحرى جثة غير مدفونة. ولكن إذا قررنا دفن الجثة، فلنعترف بحرية بالوضع الذى نحن فيه. إن النجم يستمد الطاقة، بطرق غير معلومة لنا، من خزان طاقة ضخم. ويصعب أن يكون هذا الخزان شيئًا آخر غير الطاقة المستمدة من الجسيمات الذرية التى توجد ـ كما هو معروف ـ بوفرة فى كل المواد. إننا نحلم أحيانًا أن يعرف الإنسان ذات يوم كيف يحررها ويسخّرها لخدمته. إن مخزون تلك الطاقة غير قابل للنفاد

(*) البروتون نفسه لم يُعرف بهذا الاسم إلا فى عام ١٩٢٠ والفضل فى تسميته يعود لرازرفورد فى بحث نُشر فى مجلة نيتشر (الجزء ١٠٦، ص ٢٠٠). ومن المستحيل عمليًا الخوض فى قصة تطور الفيزياء الفلكية فى العشرينيات من القرن العشرين دون التطرق إلى المفاهيم التى لم تصبح عملة رائجة إلا فى السنوات الأخيرة فقط!

تتريبًا، إذا أمكن فقط سحبها واستعمالها. إن مخزون الطاقة فى الشمس يكفى للإبقاء على ما تشعه من حرارة لمدة ١٥ مليار عام.

لقد برهن أستون بشكل قاطع ومقنع أن كتلة ذرة الهليوم أقل من مجموع كتل ذرات الهيدروچين الأربع الداخلة فى تكوينها ـ وقد اتفق الكيميائيون معه فى ذلك. هناك نقص فى الكتلة أثناء عملية التوليف يصل إلى جزء لكل ١٢٠ جزءًا، فالوزن الذرى للهيدروچين ١،٠٠٨ فى حين أن الوزن الذرى للهليوم هو ٤. ولن أطيل فى هذا البرهان المتقن حيث يمكنكم بلا شك سماعه منه شخصيًا. والآن لا يمكن للمادة أن تَفْنَى والنقص يمكن فقط أن يمثل كتل الطاقة الكهربية التى تحررت فى عملية التحول. ونستطيع بالتالى أن نحسب فى التوّ كمية الطاقة التى تحررت عندما يتكون الهليوم من الهيدروچين. وإذا كانت ذرات الهيدروچين تمثل ٥٪ من كتلة نجم، وهذه الذرات تتحد تدريجيًا لتكوين عناصر أكثر تعقيدًا، فإن إجمالى الحرارة المطلقة ستكون أكثر من كافية لاحتياجاتنا، ولن نحتاج بعد ذلك إلى البحث عن مصدر طاقة النجوم.

وإذا كانت طاقة جسيمات الذرة الموجودة فى النجوم تُستخدم بحرية للحفاظ على أتونها الهائل، فإن ذلك قد يقربنا قليلاً من اكتمال حلمنا بالتحكم فى هذه القوة الكامنة لخير الجنس البشرى ـ أو لانتحاره»(*).

يصف سوبرهمانين شندرسخار(**) فى كتابه «إدينجتون» هذه التعليقات بأنها «من أكثر المقولات بصيرة فى كل ما كُتب فى مجال الفلك». وهذا التعليق رغم مجيئه متأخرًا، إلا أنه على الأقل حقيقى جزئيًا. لم يتمسك إدينجتون نفسه بقوة بفكرة الطاقة الناتجة من تحول الهيدروچين إلى هليوم، بل فكر أيضًا فى إمكانية الفناء الكامل للبروتونات والإلكترونات وتحولها إلى طاقة، وهو ما نعرف الآن أنه كان منعطفًا خاطئًا. ولسنوات، ظلت فكرة التحول مجرد احتمال يقبل البحث. وعلى المستوى الاجتماعى، كان إدينجتون من جماعة الكويكرز، ولقد واجه بعض الصعوبات مع السلطات

(*) من مجلة المرصد observatory، الجزء ٤٣، ص ٣٥٣ استشهد بها شندرسخار، فى كتابه إدينجتون ص ١٧. كما أقر إدينجتون بنفسه، لقد أشار چين بابتيست الفرنسى أيضًا إلى ما تضمنته اكتشافات أستون فى ١٩٢٠ (النشرة الشهرية، الجزء ٢١، ص ١١٣ الذى أورده إدينجتون فى كتابه التكوين الداخلى للنجوم، ص ٢٩٦) لكنه لم يطور أبدًا فهمًا كاملاً عن البنية النجمية، ومضامين هذا الانطلاق للطاقة دون الذرية كما استطاع إدينجتون.

(**) Subrahmanyan Chandrasekhar.

البريطانية بسبب معتقداته الداعية للسلام أثناء الحرب العالمية الأولى، وكان يرى أن تأثيرات معادلة لآينشتاين ليست مقصورة على إنتاج الطاقة فى النجوم، لكنها تتضمن كذلك نعمة لسكان الكرة الأرضية.

نجوم بسيطة

لقد ضمَّن إدينجتون أبحاثه فى مجال الفلك فى واحد من أهم الكتب العلمية، ألا وهو كتاب «التكوين الداخلى للنجوم»، الذى كتبه ما بين مايو ١٩٢٤ ونوفمبر ١٩٢٥، وصدر فى عام ١٩٢٦. ولا يزال هذا الكتاب حتى يومنا هذا، كتابًا أساسيًا فى مجال الفيزياء الفلكية. يعرض إدينجتون فى هذا الكتاب القواعد الأساسية التى يحتاجها الباحث فى تطبيق الفيزياء على دراسة تكوين النجوم ـ كيف تتوازن قوة الجاذبية نحو الداخل مع الضغط نحو الخارج الذى يمارسه قلب النجوم الساخن، وكيف أن الكثافة والحرارة تتغيران من مكان لآخر داخل النجم، والعلاقة بين كتلة النجم ودرجة جلائه، أى المقدار النسبى للضوء الذى يشعه، وغير ذلك كثير. رغم انزلاقه أيضًا فى بعض المنعطفات الخاطئة، مثل فكرة فناء المادة فى النجوم. ولن أسهب فى الحديث عن ذلك هنا، ولكنى سأركز على التطورات الرئيسة التى أدت فى نهاية المطاف إلى تحديد هوية مراكز الطاقة الهائلة.

إن أحد أهم ما جاء به إدينجتون هو أننا «لا» نحتاج لكى نصف ما أسماه «بشىء بسيط جدًا» مثل النجم أن نعرف من أين يستمد هذا النجم طاقته. إن قوانين الفيزياء تخبرنا أن كرة من الغاز تحتوى على قدر معين من المادة وتتماسك بتأثير الضغط داخلها يجب أن يكون لها حجم معين وأن تشع كمية معينة من الطاقة. لا يهم من أين تأتى هذه الطاقة ـ فكما رأينا، بدون تزوُّد بالطاقة سينكمش النجم ببطء، لكن الطريقة التى تتصرف بها مادة النجم لا تتغير أيًا كان مصدر الطاقة داخله. غير أن الأمر يدعو للدهشة بالنسبة لغير الفيزيائيين، أن تكون القوانين العلمية التى تصف طبيعة النجم هى نفسها قوانين سلوك ما يُسمى «بالغازات المثالية» ـ بالرغم من أن «متوسط» كثافة الشمس يُقدر حوالى مرة ونصف كثافة الماء، وأن الكثافة فى قلب الشمس تزيد عدة أضعاف على كثافة الرصاص. وهوَ ما لا نفكر فيه عادة على أنه

«غاز». لكن حقيقة أن هذه المادة الكثيفة تتصرف مثل الغازات، ترتبط مباشرة بالطريقة التى يجعل بها الضغط النجم يتماسك فى مواجهة الجذب إلى الداخل الذى تمارسه قوة الجاذبية.

من السهل فهم سبب سخونة باطن النجم. فكما رأينا، عند تكوُّن النجوم تتحرر طاقة الجاذبية فى شكل حرارة، كما أن تعرض أى شىء للانضغاط يؤدى إلى رفع درجة حرارته، مثل الهواء فى مضخة الدراجة (والتأثير المعاكس أن تنخفض درجة حرارة الغازات عند تمددها، وهو أساس عمل الثلاجة المنزلية). ويرجع جزء من الضغط داخل النجم والذى يجعله يتماسك، إلى تصادم الجسيمات داخله بسرعات عالية ـ ضغط الغاز. لكن إذا تصادمت الجسيمات بقوة كافية (وإذا كانت ساخنة بدرجة كافية)، فإن إلكترونات سالبة الشحنة تنفصل عن الذرات فى هذه العملية، وتتجول بحرية خلال النجم. وتُسمى الذرات التى فقدت إلكترونات «أيونات»، وهى تحمل شحنة موجبة، ويُسمى خليط الأيونات والإلكترونات «بلازما».

وذلك ما يجعل داخل النجم يتصرف كغاز مثالى. تتكون الذرات من نواة صغيرة جداً تحيط بها سحابة أكبر بكثير من الإلكترونات. وإذا افترضنا لتوضيح ذلك أن حجم نواة الذرة يساوى حجم حبة بازلاء، فإن سحابة الإلكترونات تكون بحجم قاعة موسيقى. فى المادة الصلبة تتلامس الذرات (سحابات الإلكترونات)، ولا تتحرك. أما فى السوائل، فإن سحابات الإلكترونات فى الذرات تكاد تتلامس مع بعضها البعض، إلا أن الذرات الفردية لديها طاقة كافية لكى تنزلق على بعضها البعض. وأما كثافة المادة الصلبة عند نقطة انصهارها، فتكاد لا تزيد على كثافة السائل الذى تنصهر إليه. لكن فى الغازات، تكون لدى الذرات طاقة كبيرة بحيث تكاد تطير بحرية خلال الفراغ البينى، وقد تصطدم بذرة أخرى أو تحل محلها. ومن ثَم، فإن كثافة أى غاز تقليدى أقل بكثير من كثافة السائل الذى تتبخر عنه. إن أنوية الذرات أصغر بكثير من الذرات، لكن عندما تتجرد الأنوية الذرية من السحابة الإلكترونية لتكوين البلازما، فإن الأنوية لا تلامس بعضها البعض أبداً لكن المسافات تنضغط بينها جداً حتى تصل كثافتها إلى أضعاف كثافة الرصاص، لكنها تظل تطير بحرية وتتصرف مثل جسيمات الغاز. يمكنك أن تضع «كمية كبيرة» من حبوب البازلاء. فى قاعة كارنيجى الموسيقية دون أن تلامس إحداها

الأخرى. إن أنوية الذرات تطير بحرية داخل النجم، وقد تصطدم أحيانًا مع بعضها البعض. وهى عندما تقوم بذلك، فإنها تتبع بالضبط قوانين الفيزياء التى تصف الغازات المثالية.

أما فى حالة مجموعة صغيرة نسبيًا من المادة، مثل الكوكب، فإن الذرات تبقى كذرات ويكون الضغط فى المركز كافيًا ليجعل الطبقة الخارجية متماسكة حتى بدون أن تتكون بلازما، وتتصرف المادة فى هذه الحالة كمادة صلبة أو سائلة أو غازية تبعًا لمكوناتها ودرجة الحرارة والضغط. لكن إدينجتون أدرك، أنه فى حالة كرات أكبر من المادة تبدأ أشياء أكثر إثارة فى الحدوث عند درجات حرارة أعلى وضغط داخلى أكبر، بحيث تصبح عملية التأيّن كبيرة. فبمجرد تكوّن البلازما تصبح التأثيرات الكهرومغناطيسية مهمة. إذ تقوم الجسيمات المشحونة ذات الحركة السريعة بتحويل بعض طاقتها الحركية إلى إشعاع إلكترومغناطيسى، ويتفاعل هذا الإشعاع بدوره مع الجسيمات المشحونة، خاصة الإلكترونات، فيتم امتصاصه ثم انبعاثه مرة أخرى. ويكون تأثير كل ذلك على البلازما هو ازدياد الضغط إلى الخارج، أى ضغط الإشعاع، الذى يساعد على تماسك كرة المادة - التى تمثل فى حالتنا النجم - ضد جذب قوة الجاذبية. إذًا، إن ما يجعل النجم اللامع المستقر يتماسك، هو تضافر قوتين: ضغط الغاز وضغط الإشعاع.

لكن دعونا الآن نتأمل النقيض الآخر. ولنتصور كرة ضخمة من الغاز تحاول أن تتشكل فى هيئة نجم. سترتفع درجة الحرارة فى المركز إلى درجة هائلة بحيث يتكون ضغط إشعاعى هائل يفجر النجم إلى أشلاء.

إذًا، هناك ثلاثة مصائر ممكنة لكرة غاز تنهار تحت قوة جاذبيتها ذاتها، وذلك وفقًا لكتلتها. فقد تصبح كرة صغيرة باردة لا تتماسك إلا بقوة ضغط الغاز، أو قد تصبح نجمًا متوهجًا يتماسك بفضل خليط من ضغط الغاز وضغط الإشعاع، أو تصبح كرة غازية شديدة الحرارة قصيرة العمر سرعان ما تنفجر تحت تأثير ضغط الإشعاع. وبالتالى لا توجد نجوم إلا فى نطاق كتل معينة، بحيث يشترك ضغط الغاز وضغط الإشعاع بشكل متساوٍ تقريبًا فى الإبقاء على كرة الغاز ضد شد قوة الجاذبية. ولا يكون ذلك صحيحًا إلا فى نطاق محدود من الكتل.

وهو بالتحديد هذا النطاق من الكتل الذى يعتمد اعتمادًا طفيفًا على مكونات النجم، لأن ذلك يؤثر على عدد الإلكترونات المحيطة التى تتفاعل مع الإشعاع. وكما سنرى فى الفصل التالى، وقع إدينجتون، فى كتابه المهم، فى استنتاج خاطئ حول تكوين الشمس، غير أنه خطأ تافه مقارنة مع قوة اكتشافه لأهمية تطبيق قوانين الغازات على النجوم. حيث يطلب إدينجتون فى كتابه «التكوين الداخلى للنجوم» من القارئ تصوّر مجموعة من كرات الغاز مختلفة الأحجام، بادئًا بعشرة جرامات ثم مائة جرام ثم ألف جرام، وهكذا. وتحتوى الكرة رقم (ن) على $(١٠)^{ن}$ جرام من المادة. وطبقًا لقوانين الغازات، فإن الكرات التى يتضافر فيها ضغط الإشعاع وضغط الغاز لإنتاج نجوم مستقرة ومتوهجة هى «فقط» الكرات التى تحمل أرقامًا من ٣٢ إلى ٣٥ فى السلسلة(*). وعندما ننظر إلى الكون يثبت لنا صدق هذا التنبؤ الفيزيائى النظرى. فإن كتلة الكرة رقم ٣١ تساوى خمسة أضعاف كتلة المشترى وهو أكبر كوكب فى مجموعتنا الشمسية. وتساوى كتلة الكرة ٣٢، $(١٠)^{٣٢}$ جرام، أى حوالى واحد على عشرة من كتلة الشمس، وتبلغ كتلة الكرة ٣٥ مائة ضعف كتلة الشمس. ومعنى ذلك أن النجم لا يستطيع أن يبدأ فى التوهج إلا إذا كان أكبر من المشترى وتساوى كتلته عُشْر كتلة الشمس تقريبًا، لكن إذا زادت كتلته على مائة ضعف كتلة الشمس، فإن قوة الجاذبية تكون غير كافية لتجعله يتماسك ويقاوم انفجار طاقة الإشعاع المتجه من قلبه الساخن إلى الخارج. ومن بين العدد اللانهائى من كرات الغاز التى نستطيع تخيلها تتطابق فقط مع توصيف النجوم الكرات من ٣٢ إلى ٣٥ فى قائمة إدينجتون. وأخبر إدينجتون علماء الفلك، مستخدمًا الفيزياء النظرية، مدى جلاء النجوم ذات الكتل المختلفة وكمية الضوء التى يتعين أن يشعها كل منها. وتقع شمسنا فى أسفل نهاية نطاق هذه النجوم، ممتثلة للقوانين الأساسية لفيزياء الغازات، أيًا كان مصدر طاقتها.

وقد تطابقت حسابات إدينجتون أيضًا مع اكتشافات تمت من خلال مراقبة نجوم أخرى. وكان لاكتشاف العلاقة بين كتلة النجم وجلائه(**) (النجوم ذات الكتلة الصغيرة تكون باهتة، بينما تكون النجوم ذات الكتلة الأكبر أكثر جلاءً) تأثير كبير فى تطوير وفهم كيف تعمل النجوم. لكن إدينجتون وجد أيضًا أن كل نجوم «السلسلة الرئيسة» - وهى

(*) استعنت هنا بالصورة الحديثة لحساب إدينجتون باستخدام أعداد ملائمة للتكوين الراقمى للشمس.

(**) المقدار النسبى لضيائية النجم دون اعتبار لبعده.

المجموعة التى تنتمى لها شمسنا - يجب أن تكون درجة حرارتها المركزية واحدة، بغض النظر عن كتلتها وجلائها. لكن الرقم الذى استنتجه إدينجتون لهذه الحرارة المركزية الحاسمة، وهو ٤٠ مليون درجة، كان عاليًا جدًا. ومنذ أبحاثه الرائدة، أُدخلت تحسينات على الحسابات الفيزيائية لقلب النجوم بطرق صغيرة متعددة، والرقم المقبول حاليًا هو حوالى ١٥ مليون درجة(*). لكن هذا التعديل الطفيف نسبيًا لا يؤثر على اكتشافه المهم أن كل نجوم السلسلة الرئيسة «تحرق» فى مركزها طاقة عند درجة حرارة «واحدة».

وكما أشار إدينجتون فى كتابه، عند تناوله الطاقة المنبعثة من نجمين معينين (ص ١٧٩) «عندما نتناول هذه القيَم بصفتها قيمًا ظاهرية، فهناك حاجة إلى مخزون طاقة ٦٨٠ إرج لكل جرام (بالنسبة للكوكبة الكوثل)(**)، أو إلى مخزون طاقة ٠،٠٨ إرج لكل جرام (فى كوكبة كروجر ٦٠)، فإن درجة حرارة النجم يجب أن ترتفع إلى أربعين مليون درجة مئوية للحصول على هذه الطاقة. وعند درجة الحرارة تلك يسحب النجم من مدد لا نهائى من الطاقة». وقام بعد ذلك بتطوير هذا المفهوم فى جزء لاحق من الكتاب (ص ٢٢٩). إن النجم «سينكمش حتى تبلغ درجة حرارته المركزية أربعين مليون درجة، وعندئذ يتحرر فجأة المخزون الرئيس للطاقة.. لا بد لأى نجم من نجوم السلسلة الرئيسة أن يُبقى على قدر كافٍ من مادته عند درجة حرارة أعلى من درجة الحرارة الحرجة لتوفير المدد المطلوب».

ويُعد ذلك مثالاً جميلاً لعملية التغذية الارتجاعية التى تحافظ على التوازن فى مثل هذا النجم. لنفترض أن النجم - أى نجم - انكمش أكثر قليلاً. سترتفع درجة حرارة مركزه، نظرًا لتحول طاقة الجاذبية إلى حرارة، وبالتالى سيتم تحرير مزيد من الطاقة المستمدة من جسيمات الذرة، والتى قد تؤدى إلى تمدد النجم، مستعيدًا بذلك توازنه. أو لنفترض أن النجم تمدد قليلاً لسبب ما. إن ذلك سيجعله أقل حرارة فى الوسط، مما يبطئ تحرير الطاقة ويجعله ينكمش مرة أخرى. إن النجوم لديها ثرموستات(***) داخلى يحفظ مراكزها عند درجة الحرارة المناسبة لتحرير الطاقة دون الذرية، أى الخاصة بالجسيمات الذرية. وهكذا تمارس الفيزياء مهامها بشكل

(*) تلك بالطبع درجات كلفن، مقاسة من الصفر المطلق، أى - ٢٧٣م.

(**) كوكبة جنوبية، والإرج هو وحدة الشغل المطلقة فى النظام المترى. (المراجع).

(***) أداة أتوماتيكية لتنظيم الحرارة. (المترجم).

محكم. لكن ظلت لدى إدينجتون مشكلة كبرى، ألا وهى إقناع أصدقائه من علماء الفيزياء بأن هذه هى فعلاً الطريقة التى تعمل بها النجوم «وتكمن الصعوبة فى أن درجة حرارة النجوم من وجهة نظر الفيزيائيين منخفضة بشكل مضحك. فهم يعتبرون أن النجوم عمليًا عند درجة الصفر المطلق، لأن أربعين مليون درجة تُعتبر، بالنسبة للعمليات النووية، كمية صغيرة تكاد لا تستحق الاهتمام بها». (التكوين الداخلى، ص ٣٠٠).

المشكلة أن الفيزيائيين فى منتصف العشرينيات من القرن العشرين أجروا حسابات اثبتت أن الطاقة المطلوبة لكى تجعل الأنوية تتفاعل مع بعضها البعض فى المقام الأول هى أكثر بكثير من طاقة حركة الجسيمات داخل الشمس عند درجة الحرارة التى حسبها إدينجتون. مبدئيًا، هناك وفرة متاحة من الطاقة النووية، لكن كيف تستطيع النجوم تحرير هذه الطاقة عند درجة حرارة منخفضة لهذا الحد؟ كان ذلك، فى منتصف العشرينيات من القرن العشرين، هو الاعتراض الرئيس ضد نظريات إدينجتون الخاصة بتوليد الطاقة النجمية، لكنه تشبث بنظريته بقوة. فلقد أشار إلى «أن الهليوم الذى نتعامل معه يجب أن يكون قد تكوَّن بشكل ما وفى مكان ما وفى زمن ما». «لن نجادل مع الناقد الذى يقول إن سخونة النجوم غير كافية لهذه العملية، وإنما يكفينا أن نقول له أن يذهب ويعثر على مكان أكثر سخونة» (ص ٣٠١)(*).

وفى الوقت الذى كانت فيه كلماته فى مرحلة الطباعة، بدأ تطور فهم جديد للفيزياء من شأنه أن يفك الاشتباك. لقد ذكر إدينجتون فى مقدمة كتابه، التى ترجع إلى يوليو ١٩٢٦، أنه «فى اللحظة التى تُطبع فيها هذه الكلمات بدأت تظهر «نظرية كَمّ جديدة» قد يكون لها ردود فعل مهمة على مشكلة الطاقة النجمية عندما يتم تطويرها بالكامل» وكان على صواب، إذ كانت أول ثورة كبرى فى الفيزياء فى القرن العشرين هى النظرية النسبية، التى قدمت مفهومًا مبدئيًا لإمكان تحول الكتلة إلى طاقة، وفتحت بذلك إمكانية امتداد حياة نجم مثل الشمس لمليارات السنوات. أما ثانى ثورة كبرى فى الفيزياء فى القرن العشرين فكانت فيزياء الكم، التى أوضحت كيف يمكن حدوث ذلك عمليًا، وإن ظروف الحرارة والضغط فى قلب الشمس، التى حسبها إدينجتون كانت فعلاً صحيحة تمامًا بحيث تسمح بحدوث سلسلة التفاعلات التى حولت بالفعل

(*) عندما كان إدينجتون يؤكد اقتناعه بقوانين الفيزياء التى تكشف، دون احتمال للبس، عن حرارة قلب الشمس كان كمن يقول لمعارضيه «اذهبوا إلى الجحيم».

أربعًا من أنوية الهيدروجين (بروتونات)، فى كل مرة، إلى أنوية هليوم (جسيمات ألفا).

وكانت الرسالة من النوع الجدير بالتقدير والتى يتكرر مضمونها فى تاريخ العلم وتعنى أنه عندما تؤكد المشاهدة أن شيئًا ما حدث، بينما تنص النظرية على استحالة ذلك، فإن ذلك يعنى أن الوقت قد حان لتغيير نظريتك، وليس المشاهدات! لكن الآمال التى عبر عنها إدينجتون فى يوليو ١٩٢٦ استغرقت أكثر من عشر سنوات لكى تصبح واقعًا، بفضل تطور الفهم الكامل لأسلوب إنتاج الطاقة داخل الشمس والنجوم.

الفصل الثالث

فى قلب الشمس

فى الكلمة التى وجهها لجمهور الجمعية البريطانية فى عام ١٩٢٠ - التى سبقت الإشارة إليها فى الفصل الثانى - علق إدينجتون تعليقًا على مصدر طاقة الشمس اتسم ببصيرة ثاقبة. فأشار إلى إمكانية ان تكون الطاقة دون الذرية(*) قد تحررت بالفعل داخل النجوم، وذكر أن تجارب أستون لم تترك، فيما يبدو إلا مجالاً صغيرًا للشك فى أن كل العناصر تتكون من ذرات هيدروچين مرتبطة معًا بإلكترونات سالبة. فنواة ذرة الهليوم مثلاً تتكون من أربع ذرات هيدروچين مرتبطة بإلكترونين. لكن أستون برهن أيضًا بشكل حاسم على أن كتلة ذرة الهليوم أقل من مجموع كتل ذرات الهيدروچين الأربع الداخلة فى تكوينها. إن تحول العناصر يمكن، إذا حدث، أن يحرر طاقة مساوية للفرق فى الكتلة، و«إذا كان ٥٪ من كتلة النجم تتكون أصلاً من ذرات هيدروچين، وأن هذه الذرات تتحد تدريجيًا لتكون عناصر أكثر تعقيدًا، فإن إجمالى الحرارة المنبعثة ستزيد على احتياجاتنا، ولن نحتاج إلى مزيد من البحث عن مصدر طاقة النجوم».

كانت نقطة الشك الوحيدة حينذاك هى أن تحول العناصر داخل النجوم قد لا يحدث فى الواقع. لكن إدينجتون كان لديه رد على ذلك. حيث قال لجمهور

(*) المتعلقة بباطن الذرة أو بالجسيمات الأصغر من الذرة. (المترجم).

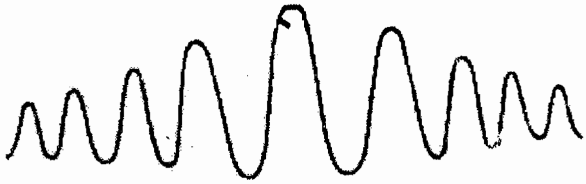
الحاضرين إن رازرفورد قام مؤخرًا بتفكيك ذرات أكسچين ونيتروچين. وحصل منهما على نظير للهليوم، و«ما يمكن تحقيقه فى معمل كافنديش قد لا يصعب تحقيقه فى الشمس». كان إدينجتون قريبًا جدًا من الحقيقة، لكن تخمينه الحدسى افتقر إلى البرهان العلمى.

قبل إثبات الأهمية الحقيقية لتحول الهيدروچين إلى هليوم، وقبل أن يتمكن علماء الفلك من إدراك أن الهيدروچين يشكل أكثر من ٥٪ من كتلة نجم مثل الشمس، كانت ثورة الكم قد زودت الفيزيائيين بمجموعة جديدة من الأدوات لوصف طريقة تفاعل الجسيمات فى ظل الظروف الموجودة فى قلب الشمس. وكان أهم هذه الأدوات مبدأ الريبة Principle of Uncertainity .

مبدأ الريبة فى نظرية الكم

لقد رويتُ قصة ثورة الكم بالتفصيل فى كتابى «بحثًا عن قط شرودينجر» - قصة عالم الكم الغريب، عالم الجسيمات مثل الإلكترونات والبروتونات، التى يتعين النظر إليها على أنها موجات بقدر ما هى جسيمات، وإلى الموجات، مثل الضوء على أنها جسيمات (فى حالة الضوء، فوتونات). ومن أغرب سمات حقيقة الكم، اللصيقة بهذه الطبيعة المزدوجة : موجة/ جسيم، هى مبدأ الريبة. ففى عالم الكم، لا يمكنك قط أن تجزم تمامًا بموقع الجسيم - ليس لمجرد صعوبة قياس موضع شىء صغير جدًا مثل الإلكترون، لكن لأن موضعه «ليس له» نقطة محددة بدقة. ذلك لأن الجسيم أيضًا موجة - والموجة، بطبيعتها، شىء ممتد ومنتشر (شكل ٣ - ١). إن هذه السمة لعالم الكم هى التى فسرت كيف استطاعت جسيمات ألفا ـ ما نسميه الآن أنوية هليوم ـ الهروب من أنوية ذرات المواد المشعة.

لقد كان واضحًا فى العشرينيات من هذا القرن، أن الذرات تتكون من سحابة من الإلكترونات ذات شحنة سالبة تحيط بنواة صغيرة جدًا ذات شحنة موجبة. وفى الحالة العادية، تكون الذرة متعادلة كهربيًا، حيث يتوازن تمامًا عدد الإلكترونات فى السحابة الخارجية مع عدد البروتونات فى النواة الموجبة ـ لكن النواة تحتوى أيضًا على جسيمات متعادلة، مماثلة للبروتونات لكن شحنتها صفر وتُسمى نيوترونات.



شكل (١ - ٣) : حزمة موجية. يفضل اعتبار أن الجسيمات الأولية، مثل الإلكترونات والبروتونات، هى حزم صغيرة من الموجات، وليست نقاطًا رياضية. إن الحزمة الموجية، بطبيعتها، شىء منتشر وممتد، ذو حجم محدد.

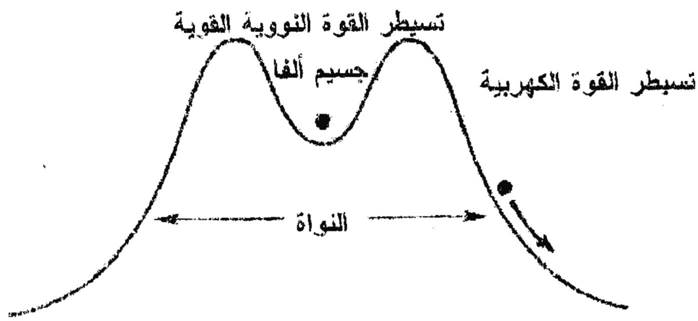
ولم تكتشف هذه الجسيمات إلا فى عام ١٩٣٢(*) . إن نواة نظير الراديوم الأكثر انتشارًا فى الطبيعة تحتوى على ٨٨ بروتونًا و١٣٨ نيوترونًا، وعندما تتحل فإنها تطرد اثنين من البروتونات ومثلهما من النيوترونات، فى شكل جسيم ألفا، يخلف وراءه نواة ذرية أقل كتلة.

إن الشحنات المتماثلة تتنافر بالطبع. ولأن جسيم ألفا يحمل شحنة موجبة وكذلك النواة التى خلفها وراءه، فلا عجب، أن يندفع جسيم ألفا بقوة تنافر قوية بعيدًا عن النواة بمجرد تكونه خارجها. لكن كل أنوية الذرات تحتوى على شحنة موجبة، ومع ذلك فإنها لا تنفجر نتيجة لتنافر الشحنات المتماثلة الموجودة على البروتونات المكونه لها. وذلك لأن هناك قوة أخرى تعمل داخل النواة، وهى القوة النووية القوية التى تطغى على قوة التنافر الكهربية بين البروتونات وتعمل على مسافات دقيقة جدًا - عبر نواة الذرة -، فتلصق خليط البروتونات والنيوترونات معًا. إن مدى عمل القوة النووية القوية قصير جدًا، ولكنها تسيطر تمامًا على القوة الكهربية عبر هذا المدى القصير. وكان أحد الألغاز التى يتعين على فيزيائيى الكم أن يحلوها فى نهاية العشرينيات من القرن العشرين هو كيف استطاع جسيم ألفا الهارب من نواة المادة المشعة أن يتغلب على هذه القوة الجاذبة للمسافة الكافية التى تسمح له بالفرار؟

وكان الجواب هو مبدأ الريبة، الذى اكتشفه العالم الروسى الشاب چورچ جامو (George Gamow) الذى كان يزور جامعة جوتينجن فى عام ١٩٢٨ (وانتقل بعد ذلك إلى الولايات المتحدة وأصبح مواطنًا امريكيًا). لقد ادرك جامو أن القواعد الدقيقة لمبدأ

(*) عندما ذكر إدينجتون فى عام ١٩٢٠ ذرات هليوم تحتوى على إلكترونين إضافيين، مرتبطين بالنواة لإلغاء بعض الشحنة الموجبة لأربع أنوية هيدروچين (أربعة بروتونات)، لم تكن النيوترونات قد اكتُشفت بعد. فى الواقع، تتكون نواة الهليوم - ٤، أو جسيم ألفا من بروتونين ونيوترونين وليس من أربعة بروتونات وإلكترونين. لكن إذا تُرك النيوترون لنفسه لأكثر من عشر دقائق، فإنه «ينحل» مطلقًا إلكترونًا ومتحولاً إلى بروتون؛ وبالتالى فإن وصف إدينجتون، رغم كل شىء، لم يكن بعيدًا عن الهدف.

الريبة فى فيزياء الكم تسمح ـ بل هى فى الواقع تقتضى ـ أن ينتشر جسيم ألفا فى بعض الأنوية عبر مسافة قصيرة، ممتدة خارج النواة تمامًا وخارج مدى القوة النووية القوية. إن التأثير المتضافر للقوة النووية القوية وقوة التنافر الكهربية ينتج طاقة تماثل ربوة تحيط بالنواة، أو حاجز يتعين على جسيم ألفا أن يتسلقه لكى يهرب. لقد بينت قياسات طاقه جسيمات ألفا الهاربة أنها لا تملك الطاقة الكافية لتسلق هذه الربوة، وأثبتت أبحاث جامو كيف يمكن لمبدأ الريبة فى فيزياء الكم أن يسمح لهذه الجسيمات، أن «تشق نفقًا» عبر هذه الربوة. وعندما وضعت الأرقام فى المعادلات، بدت ملائمة تمامًا، لقد فسر مبدأ الريبة وتأثير النفق بدقة كيف خرجت جسيمات ألفا من أنوية المواد المشعة باستخدام الطاقة المقاسة (شكل ٢ - ٣).



شكل (٢ - ٣) : إن التفاعل بين القوة النووية القوية والقوة الكهربية يكون بئرًا من طاقة الوضع حيث يتم اصطياد جسيمات نواة الذرة. وجسيم ألفا الموجود داخل البئر ولا يملك طاقة كافية لتسلق الحاجز يظل داخل هذا الفخ للأبد. لكن مبدأ الريبة لفيزياء الكم، القائل بأن الجسيم هو فى الواقع حزمة موجية تمتد فيما وراء حدود النواة، يسمح لبعض جسيمات ألفا أن تشق نفقًا عبر الحاجز وتهرب. وبالطريقة نفسها، أثناء تفاعلات الاندماج النووى تشق بعض الجسيمات من الخارج نفقًا إلى النواة عبر الحاجز.

لكن ما علاقة ذلك بالتصاق أنوية الهيدروجين معًا لتكوين نواة هليوم؟ العلاقة هى أن تأثير النفق يعمل أيضًا فى الاتجاه الآخر. فإذا اقترب بروتون من نواة ذات شحنة موجبة، فمن المتوقع أن تتنافر الشحنة الكهربية الموجبة للنواة معه وتطرده بعيدًا. وإذا كان يتحرك بسرعة كافية ـ أى بطاقة حركة كافية ـ يستطيع أن يقترب بدرجة تمكّنه من أن «يلمس» النواة، وعندئذ تستطيع القوة النووية القوية أن تمسك به وتحتجزه: وبالتالى تكون النواة قد كسبت بروتونًا وتحولت. لكن الطاقة التى يحتاجها البروتون الوافد ليكون قريبا من النواة بهذه الدرجة عالية جدًا، أعلى بكثير من الطاقة التى تملكها

البرونونات عند درجات الحرارة التى تفترض الفيزياء البسيطة لإدينجتون وجودها داخل الشمس. ومع ذلك، فإن تأثير النفق يغير الصورة. إذ يتعين فقط على البروتون، بحكم طبيعته الموجية، أن يصل قرب النواة بدرجة كافية بحيث تتداخل موجته مع موجة النواة قبل الإمساك به. إن البروتون، فى الواقع، يشق نفقًا عبر الحاجز الكهربى الذى يمنعه من التقدم. ولذلك لا حاجة لمكان «أشد حرارة» من قلب الشمس لتحويل أنوية الهيدروچين (بروتونات) إلى أنوية هليوم. وكان إدراك ذلك هو الذى دفع علماء الفيزياء الفلكية للبحث فى عمليات التحول التى تحافظ على الشمس، والنجوم الأخرى، ساخنة. غير أن الأمر استغرق منهم أكثر من عشر سنوات للوقوف على التفاصيل.

شق الأنفاق داخل النجوم

إن بصيرة جامو النافذة واكتشافه لتأثير النفق، وضع الفيزيائيين على طريقين منفصلين رغم وجود صلة بينهما.

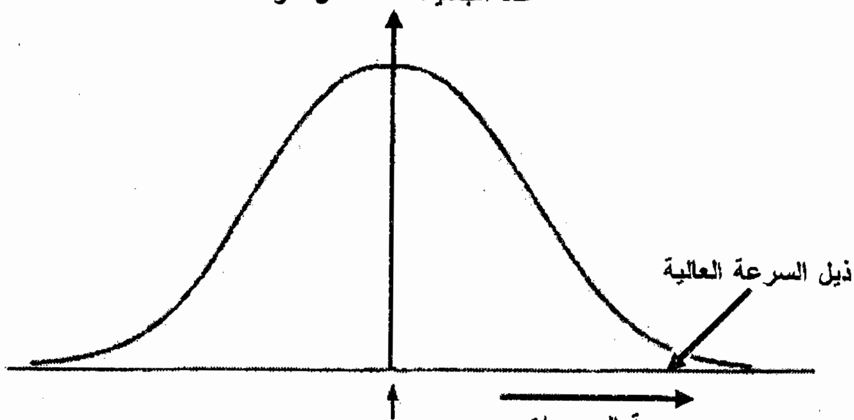
لقد منحهم ذلك، أخيرًا، فرصة فهم مصدر الطاقات الضخمة التى تزود النجوم بالحرارة، وفتح أمامهم إمكانية تحقيق حلم الخيميائيين(*)، وتحويل عنصر إلى آخر فى المعامل على الأرض. لقد كان علماء الفيزياء الفلكية الأسرع عند خط الانطلاق؛ ولكنهم استغرقوا وقتًا أطول لتحقيق هدفهم.

بدأت الخطوات الأولى بسرعة مدهشة عقب أن أعلن جامو فكرة النفق فى عام ١٩٢٨. ففى العام التالى، استخدم الفيزيائيان روبرت أتكينسون (Robert Atkinson) وفريتز هوترمنز (Fritz Houtermans) الفكرة لإثبات أن الطاقة الشمسية يمكن أن تنتج مبدئيًا عن التصاق أنوية الذرات معًا ـ وهى العملية التى تُعرف الآن بالاندماج النووى. ولقد بينت حساباتهما كيف تستطيع أنوية الهيدورچين (بروتونات) فعلاً أن تقترب من بعضها البعض لكى يحدث الاندماج، حتى فى ظل درجات الحرارة المنخفضة نسبيًا التى نصت الفيزياء صراحة على أنها توجد دون شك فى قلب الشمس. ولقد بين رودلف كيبنهاهن (Rudolf Kippenhahn)، الذى عمل مع أتكينسون فى الستينيات، (فى كتابه «١٠٠ مليار شمس») كيف تذكر أتكينسون ما الذى وجه تفكيره نحو الاتجاه السليم. لقد ذكر بوضوح أن كتاب إدينجتون «التكوين الداخلى للنجوم» جعله يدرك لأول مرة مشكلة

(*) علماء الكيمياء القدامى. (المترجم).

أن درجات الحرارة داخل النجوم ليست عالية بما يكفى لإحداث الاندماج، لكنه ذكر أيضًا أن إدينجتون كان مقتنعًا بأن الطاقة النووية «لا بد» أن تكون هى مصدر الضوء والحرارة اللذين تشعهما النجوم. كما وفى أتكينسون وهوترمنز جامو حقه فى أول جملة من البحث الذى قدماه عام ١٩٢٩ (الذى نُشر فى Zeitscrift Fur Physik المجلد ٥٤، صفحة ٦٥٦)، حيث كتبا : «لقد أثبت جامو مؤخرًا أن الجسيمات ذات الشحنات الموجبة يمكنها أن تنفذ إلى النواة الذرية، بالرغم من الاعتقاد التقليدي القائل إن طاقة هذه الجسيمات غير ملائمة».

إن مفتاح فهم كيف يجعل تأثير النفق طاقات البروتونات داخل الشمس ملائمة للقيام بالعمل هو أن عملية اندماج صغيرة يمكن أن ينجم عنها تأثير كبير. حيث تنطلق كمية كبيرة من الطاقة فى كل مرة تتحول فيها أربعة بروتونات، بأية طريقة كانت، إلى جسيم ألفا وبالرغم من أن التفاعل قد يكون نادرًا، فإنه يوفر الطاقة الكافية للاحتفاظ بالشمس ساخنة (نظرًا لأن الشمس تتكون من مليارات الجسيمات). ومن ناحية أخرى، فإن «أغلب» البروتونات عند درجات الحرارة فى قلب الشمس التى تُقدر بحوالى ١٥ مليون كلفن طبقًا للتقديرات الحديثة ـ لا تتحرك بسرعة كافية تمكنها من أن تشق نفقًا عبر الحاجز الكهربى. إن درجة حرارة أى جسم، بما فى ذلك الشمس، هى فى الواقع قياس لسرعه حركة الجسيمات المتكون منها هذا الجسم وسرعة اصطدامها ببعضها البعض، لكن هذا لا يعنى أن لكل الجسيمات الطاقة نفسها، أو السرعة نفسها بالضبط؛ فهناك سرعة متوسطة معينة أكثر شيوعًا، وتكون مناسبة لدرجة الحرارة المعينة تلك. غير أن بعض الجسيمات تفوق سرعتها سرعة هذا المتوسط، وأخرى تقل عنه، وتخضع فى ذلك لنمط محدد تمامًا وقانون إحصائى دقيق. ومن الممكن عند أية درجة حرارة حساب نسبة الجسيمات التى تتحرك بسرعة تتجاوز المتوسط بنسبة ١٠٪ أو ٥٠٪ أو ضعفَى السرعة المتوسطة، أو أية سرعة أخرى ترغب فى حساب نسبة الجسيمات التى تتحرك بها وليس السرعة المتوسطة فقط (شكل ٣ – ٣). ويُقال إن هذه الجسيمات النادرة السريعة تقع عند «ذيل السرعة العالية» لتوزيع السرعات. إن الانتصار الذى حققه تطبيق نظرية النفق لجامو على الظروف داخل الشمس، يكمن فى أنه أثبت أن عددًا كافيًا من جسيمات «ذيل السرعة العالية» يستطيع عند درجة الحرارة الملائمة، أن يشق نفقًا عبر الحاجز الكهربى. لكن هذا البحث الذى ظهر عام ١٩٢٩ لم يكن إلا الخطوة الأولى على الطريق نحو كشف سر احتفاظ الشمس بحرارتها ساخنة؛ لأنهم



شكل (٣ - ٣): حتى مع تأثير النفق، فإن عدد الجسيمات التى تتحرك بالسرعة الكافية لحدوث الاندماج داخل الشمس يكون قليلاً. وتنتمى هذه الجسيمات لـ «ذيل السرعة العالية» لتوزيع السرعات المقابلة لدرجة الحرارة فى قلب الشمس.

وقتذاك لم يكونوا يدركون بدقة ماهية تفاعلات الاندماج التى تحدث داخل الشمس وحسب، بل كانت فكرتهم عن المواد والعناصر التى تتكون الشمس منها خاطئة تماماً أيضاً. وتذكر أن أناكزاجوراس كان يعتقد أن الشمس كرة من الحديد الأحمر الساخن. وفى عام ١٩٢٩، لم يكن تصور علماء الفيزياء الفلكية لتكوين الشمس قد تقدم كثيراً عن هذه الفكرة. وكان من الطبيعى الاعتقاد بأن تكوين الشمس لن يختلف كثيراً عن تكوين الأرض. شجعت فكرة انبعاث طاقة الشمس عن الانحلال الإشعاعى لعناصر معدنية ثقيلة مثل الراديوم على تصور أن الشمس فى معظمها تتكون من عناصر ثقيلة. وهكذا، بالرغم من أن أتكينسون وهوترمانز أثبتا أن البروتونات تستطيع النفاذ إلى أنوية ذرات عناصر أثقل وتندمج معها تحت الظروف السائدة داخل الشمس، فإن أحداً لم يتوقع حتى نهاية العشرينيات من القرن العشرين أن ما يحتفظ للشمس بحرارتها هو اندماج البروتونات مع بروتونات أخرى لتكوين أنوية هليوم بشكل مباشر تقريباً وأن عملية الاندماج هى فى الواقع أكثر مصادر الطاقة فاعلية بين المصادر المختلفة.

واستمر أتكينسون فى تطوير هذه الأفكار بشكل أكثر تفصيلاً خلال الثلاثينيات، بينما انصرف هوترمانز إلى عمل آخر. وفى عام ١٩٢٨، أثبت ألبرخت أنسولد (Albrecht Unsöld) لأول مرة باستخدام التحليل الطيفى، أن الهيدروچين ليس فقط

أكثر العناصر توافراً فى الغلاف الجوى للشمس، بل إن عدد ذراته هناك يزيد مليون مرة تقريباً على أى عنصر آخر؛ وكان وليم مكريا (William McCrea) قد أكد نفس الشىء عام ١٩٢٩ باستخدام تقنية مطيافية مختلفة تماماً. لكن بالرغم من نجاح أنسولد ومكريا فى إثبات أن الهيدروچين هو العنصر الغالب بفارق هائل فى الغلاف الجوى للشمس، فقد احتاج علماء الفيزياء الفلكية إلى وقت طويل حتى يدركوا أنه العنصر الغالب كذلك «فى كل مكان» من الشمس والنجوم كلها. وحتى الثلاثينيات من القرن العشرين ظلت الشمس تخفى سرها الأساسى، ألا وهو مم تتكون. ومع ذلك، كان من الواضح أن هناك كماً وفيراً من الهيدروچين المتاح لإنتاج الطاقة عن طريق الاندماج. وفى بدايات الثلاثينيات، طور أتكينسون فكرة أن الأنوية الأثقل قد تمتص البروتونات الواحد تلو الآخر حتى تصبح غير مستقرة، ونتيجة لنوع من عسر الهضم النووى فإنها تطلق جسيمات ألفا – وهى طريقة لتحويل الهيدروچين إلى هليوم عبر وسيط. لقد كان على صواب تقريباً – وكما سنرى، فإن بعض النجوم تحصل على طاقتها بهذه الطريقة، لكن تلك ليست عملية الاندماج الرئيسة التى تتم داخل الشمس. لكن أتكينسون أثبت فى عام ١٩٣٦ أن تفاعل الاندماج الوحيد المحتمل حدوثه فى ظل الظروف السائدة فى قلب الشمس هو الاندماج البسيط لاثنين من أنوية الهيدروچين لتكوين ديوترون. فى هذه العملية، يتحول أحد البروتونات إلى نيوترون، وذلك بأن يلفظ بوزيتروناً وهو نظير للإلكترون لكنه موجب الشحنة. والديوترون هو نواة تتكون من بروتون واحد ونيوترون واحد مرتبطين معاً بالقوة النووية القوية، ويُسمى أيضاً الهيدروچين الثقيل.

لكن كل هذا الحديث عن بروتونات تتحول إلى نيوترونات وتلفظ بوزيترونات إنما يوضح حجم التغير الذى حدث فى علم الفيزياء فى سبع سنوات. فحتى عام ١٩٢٩، عندما نُشرت أبحاث أتكينسون وهوترمانز، لم تكن البوزيترونات ولا النيوترونات معروفة لأحد. فقد كانت جزءاً من النسخة الفيزيائية المعملية لقصة خيمياء القرن العشرين.

الخيمياء فى المعمل

فى عام ١٩٢٨، عندما خرج جامو بفكرة تأثير النفق، كان الفيزيائيون لا يعرفون إلا اثنين من الجسيمات «الأساسية»، وهما البروتون والإلكترون. وكان جسيم ألفا بالنسبة لهم مجموعة من أربعة بروتونات وإلكترونين مرتبطة فى وحدة واحدة معاً، وكان يمكن

تصور كل الذرات على أنها مبنية من البروتونات والإلكترونات فقط. لكن لغزًا قديمًا يدور حول طبيعة النشاط الإشعاعى، وهذه الجسيمات استعصى على الحل منذ عام ١٨٦٨، أى نفس التاريخ الذى توصل فيه رادرفورد إلى الاختلاف بين أشعتىّ ألفا وبيتا من حيث طبيعتهما. وبالرغم من الجزم بأن أشعة بيتا هى إلكترونات فى أوائل القرن، إلا أن كيفية انبعاثها من أنوية الذرات ظلت حتى نهاية العشرينيات سرًا، وأثبتت قياسات عام ١٩١٤، بصفة خاصة، أن انطلاق أشعة بيتا (إلكترونات) من ذرة نشطة إشعاعيًا (وهى ما نعرفه الآن بالنواة المشعة وليس الذرة المشعة) يؤدى إلى فَقْد الطاقة. ويتعلق ذلك بأسلوب تحول الكتلة إلى طاقة والعكس بالعكس(*) . ففى الأنوية التى تتحلل إشعاعيًا؛ تختلف كتلة النواة قبل انطلاق الإلكترون عن كتلتها وكتلة الإلكترون، معًا بعد انطلاقه؛ إذ تنطلق أثناء الانحلال طاقة تعادل مرة ونصف كتلة الإلكترون،وهذه الطاقة يستخدمها الإلكترون فى اكتساب سرعة ثابتة «واحدة» لكل الإلكترونات المنطلقة أثناء عملية تحلل بيتا. لكن الإحصاءات التى أجريت على كثير من القياسات للإلكترونات المنطلقة نتيجة تحلل بيتا أثبتت أنها تنبعث من النواة بطاقة إجمالية تقل دائمًا عن الرقم السحرى المعادل لمرة ونصف من كتلة كل إلكترون منطلق على حدة، وكأن الطاقة تبددت فى الهواء المتطاير.

وفى عام ١٩٣٠، فسَّر ڤولفجنج پولى (Wolfgang Pouli) هذا التفاوت بوجود نوع آخر من الجسيمات، معدوم الشحنة الكهربية وضئيل الكتلة جدًا لم يسبق رصده معمليًا قبل ذلك الوقت. والدور الوحيد لهذا الجسيم هو حمل الطاقة المفقودة أثناء «انحلال بيتا» بعيدًا. وفيما بعد أُطلق على هذا الجسيم المفترض وجوده اسم «النيوترينو»، ثم نجح العلم بعد ذلك فى رصده. والفصل الرابع سيخبرنا الكثير عن هذه الجسيمات. لكن فى عام ١٩٣٠، كان افتراض وجود نوع آخر من الجسيمات الأساسية غير البروتون والإلكترون بمثابة جرأة انتحارية.

ولم يمض عامان، أى فى عام ١٩٣٢، إلا وكان اكتشاف النيوترون قد أكد أن التفاعلات داخل الذرات لا تنحصر فى نطاق التفاعل بين البروتون والإلكترونات، وأكسب ذلك فكرة وجود النيوترينو وجاهة، ولم يمض زمن طويل حتى أصبح تفسير

(*) يجرى حديثى فى هذا الفصل وغيره من الكتاب باستخدام أسماء وأفكار لم تكن معروفة قديمًا، مثل التحلل الإشعاعى (وغيره من العمليات) لتجنب اللبس.

حدوث انحلال بيتا يقوم على وجود نوع آخر من القوة هى القوة النووية الضعيفة، التى تحدد كيف يمكن للنيوترون أن يتحول إلى بروتون بإطلاق إلكترون ونيوترينو. ففى عملية انحلال بيتا، تفقد نواة المادة المشعة نيوترونًا وتكتسب بروتونًا ومتحولة فى هذه العملية إلى نواة عنصر آخر. وأدت إضافة النيوترون والنيوترينو إلى القائمة، إلى تضاعف الجسيمات الأساسية المعروفة فى مدى عامين. ولكن، ما دور البوزيترون فى القصة؟

فى عام ١٩٢٩، عندما بدءوا يأخذون نظرية النفق وما تنطوى عليه من آثار مأخذ الجد، خرج الفيزيائى البريطانى پول ديراك (Paul Dirac) بفكرة بدت لأول وهلة ضربًا من الخيال. فلقد وجد عند بحثه فى معادلات جديدة فى فيزياء الكم (معادلات وضعها بنفسه)، أن ما يصف سلوك الإلكترون منها (بما فى ذلك طبيعته المزدوجة «موجة/ جسيم») لها حلان مختلفان. ويشبه ذلك تقريبًا حل المعادلات التربيعية البسيطة بطريقتين، فلأبسط معادلة تربيعية، س^{٢} = ٤، حلان، س = ٢، س = - ٢. وكلاهما صحيح لأن ٢ × ٢ = ٤ و(-٢) × (-٢) = ٤.

لكن معادلات ديراك كانت أعقد من ذلك ولا شك، وإن كانت فى النهاية تُحل بنتيجتين، ووصف الإلكترون لا يحتاج إلا لحل واحد. وضن ديراك بالجمل الرياضية التى تفنن فى وضعها بعشق، لذلك افترض أن الحل «الزائد» لمعادلاته يصف جسيمًا كالإلكترون وإن كان موجب الشحنة. ولم يؤمن بفكرته إلا القليل أو ربما لم يؤمن بها أحد حتى كشفت دراسات للأشعة الكونية عام ١٩٣٢ (جسيمات عالية الطاقة تأتى من الفضاء الخارجى) عن وجود إلكترونات ذات شحنة موجبة - بوزيترون. وثبتت صحة حلول معادلات ديراك. ومع إطلالة عام ١٩٣٣، أصبح جميع اللاعبين الأساسيين المشاركين فى لعبة خيمياء الشمس القديمة معروفين، رغم عزوف الفيزيائيين جميعًا عن الالتفات إلى النيوترينو بالذات.

لكننا نعلم الآن أن وجود جسيم أشبه بصورة المرآة للإلكترون، يقابله تمامًا وجود «جسيمات عكسية»، أى صور مرآة للنيوترون والبروتون والنيوترينو. وهكذا تخيل أن كل الكواكب والنجوم تتكون من هذه المواد - لكن قليلاً منها جدًا يبقى فى الجزء الكونى الذى تسبح فيه الأرض لأن أى «جسيم مضاد» يقابل نظيره يتبدد فى انفجار يحوله إلى إشعاع بحت بحيث تتحول كتلة الجسمين إلى طاقة. ونكاد نجزم أن الكون بأكمله مكون من مادة لا تقابلها مادة مضادة. لكن ذلك لا يمنع خروج جسيمات مضادة مثل

البوزيترون من التفاعلات النووية، حيث تشارك فى تفاعلات نووية أخرى خلال فترة حياتها القصيرة.

وبينما انشغل بعض العلماء بما تعنيه معادلات الكم، «وبابتكار» جسيمات جديدة لتعليل اختفاء الطاقة المفقودة أثناء انحلال بيتا، كان علماء الفيزياء الأكثر ميلاً إلى الفكر العملى منغمسين فى تجارب على غرار تلك التى بدأت ثورة فيزياء الجسيمات بها - وذلك بضرب الذرات (الأنوية) بعضها ببعض بأقصى درجة من العنف ومراقبة النتائج. لكن هذه المرحلة بالذات من ضرب الذرات بعضها ببعض كانت نتيجة مباشرة لتطور أفكار الكم الجديدة : فقد انبثقت عن نظرية النفق التى قال بها جامو.

فى أوائل الثلاثينيات، ابتكر الفيزيائيون أول الآلات التى يمكنها إحداث تسارع لأشعة البروتونات، وصولاً إلى طاقات عالية، باستخدام مجالات كهربية. وطاقة الأشعة الناتجة عن مسارعات الجسيمات تُقاس عادة بالطاقة التى يكتسبها إلكترون عند مسارعته عبر فرق جهد كهربى يُقدر بڤولت واحد (إلكترون ڤولت).

وتفترض المعادلات القديمة التى كانت تصف الاصطدام بين البروتونات والأنوية الذرية أن طاقة البروتونات اللازمة للاقتراب بالقدر الكافى من الأنوية «للالتصاق» بها، لا تقل عن عدة ملايين إلكترون ڤولت حتى يمكن أن تؤثر فى القوة النووية القوية. ولما كانت النظرية القديمة تفترض أن درجة حرارة الشمس أقل من الدرجة اللازمة لحدوث مثل هذه التفاعلات فقد كان الفيزيائيون، فى أواخر العشرينيات من القرن العشرين، موقنين سلفًا بأن أى مسارعات يمكن إعدادها على الأرض لن تنجح فى جعل البروتونات تلتصق بالأنوية فى المعمل. لكن معادلات جامو الخاصة بتأثير النفق صدقت فى المعمل على الأرض كما صحت داخل الشمس.

فى نهاية العشرينيات، كانت الجسيمات الوحيدة التى يمكن للفيزيائيين استخدامها فى تجارب قذف الأنوية الذرية، هى جسيمات ألفا المنبعثة من الانحلال الإشعاعى. وكانت جسيمات ألفا هى التى أحدثت أول عمليات تحول ناجحة للعناصر، عندما اكتشف رازرفورد فى عام ١٩١٩ أنه عند اصطدام هذه الجسيمات السريعة بنواة نيتروچين فإنها تتحول إلى نواة أكسچين، بينما تنطلق من هذا التفاعل نواة هيدروچين أطلق عليها رازرفورد اسم «بروتون». فحتى قبل أن يحدد رازرفورد هوية البروتون كجسيم أساسى، كان الفيزيائيون قد اكتشفوا أن من الممكن الحصول عليه بتجريد

الذرات كهربيًا من الإلكترونات. وبعد عشر سنوات من أول تحويل للنتيروچين إلى أكسچين، عرف الفيزيائيون كيف يحصلون على بروتونات بوفرة. لكن ما أهمية بناء مسارع للبروتون إذا كانت هذه البروتونات المتسارعة لن يكون لديها الطاقة الكافية لاختراق الحاجز الكهربى الموجود حول النواة! غير أن چون كوكروفت (John Cockcroft) - أحد أحدث أعضاء فريق أبحاث راذرفورد فى معمل كافنديش - عرف فى عام ١٩٢٩، فى حديث له مع جامو، أن بروتونات لا تزيد طاقتها على مئات الكيلووات من الإلكترون ڤولت تستطيع اختراق الحاجز النووى. وكان يعرف سلفًا أن بناء مسارع للبروتونات يحقق هذا المستوى من الطاقة باستخدام تقنيات ذلك الوقت أمر ممكن؛ لكن بناءها سيكلف كثيرًا.

وكوكروفت، هو فيزيائى ولد فى عام ١٨٩٧ وبدأ متأخرًا بعض الشىء فى هذا التخصص، حيث قطعت خدمته العسكرية أثناء الحرب العالمية الأولى دراسته. وكانت لديه خلفية جيدة فى الهندسة الكهربائية، اكتسبها من عمله فى الجيش فى سلاح الإشارات، فأفاده ذلك كثيرًا فى العمل الذى جعله شهيرًا.

ونجح كوكروفت فى إقناع راذرفورد باستخدام نفوذه فى الحصول على المال اللازم لذلك وهو مبلغ ألف جنيه إسترلينى، الذى كان يمثل فى ذلك الوقت مبلغًا كبيرًا. وفى خلال عامين من العمل الدءوب، نجح كوكروفت بمعاونة باحث إيرلندى ناشئ هو أرنست والتون فى إقامة أول مسارع جسيمات ينتج شعاعًا من البروتونات تزيد طاقتها على ٧٠٠ كيلو إلكترون ڤولت. وكان الأساس المنطقى لهذا المشروع، عكس الفكرة الطريفة التى تضمَّنها خطاب إدينجتون أمام الجمعية البريطانية عام ١٩٢٠: «إن ما يمكن حدوثه فى معمل كافنديش قد لا يستحيل حدوثه فى الشمس». كان جامو قد أشار إلى أن الأسلوب الذى يحدث به الاندماج داخل الشمس عند درجة حرارة منخفضة نسبيًا، وهى ١٥ مليون كلڤن، يعنى أن الحصول على هذا الاندماج فى المعمل باستخدام بروتونات طاقتها بضع مئات من الكيلو إلكترون ڤولت ـ أمر ممكن فى الواقع. والحقيقة أن ما يمكن حدوثه داخل الشمس قد لا يكون صعبًا فى معمل كافنديش. وتم بالفعل بناء أول مسارع جسيمات فى معمل كافنديش ـ وفى عام ١٩٣٢، أنتج هذا المسارع تفاعلات اندماج نووى (ونال كوكروفت ووالتون جائزة نوبل لعام ١٩٥١ عن ذلك العمل).

وقد يصدم ذلك الذين يعرفون أن الباحثين مازالوا حتى يومنا هذا يصارعون للحصول على طاقة بتكلفة تجارية من خلال نفس نوع تفاعلات الاندماج التى تحدث داخل النجوم، وإن كانت على الأرض. لكن مشكلتهم - هى الحصول على تفاعل مستقر يمكن استخدامه بأمان فى محطات القوى بصفة يومية ومنتظمة - وهو أمر أكثر صعوبة. إذ إن كوكروفت ووالتون لم يفعلا أكثر من قذف أنوية مواد مختارة ببروتونات ثم فحصها؛ لتحديد أيها امتص البروتونات وتحول إلى عنصر آخر خلال العملية. وقد يبدو ذلك سهلاً ولكنه حقق حلم الخيميائيين القديم، ألا وهو تحويل العناصر، ودفع ذلك الفيزيائيين خطوات حاسمة إلى الأمام نحو معرفة سر بقاء الشمس ساخنة.

وكان الهدف الذى اختار كوكروفت ووالتون أن يقذفاه بشعاع بروتوناتهما هو طبقة رقيقة من الليثيوم. والليثيوم هو ثالث أخف العناصر بعد الهيدروچين والهليوم، وهو أخف مادة صلبة يمكن أن توجد فى الظروف العادية. وكل نواة ذرة ليثيوم تحمل ثلاث وحدات فقط من الشحنة الموجبة. وبالطبع، كلما كانت الشحنة الموجبة فى الأنوية المختارة أصغر، كان أسهل على البروتونات فى الشعاع أن تشق نفقًا عبر الحاجز الكهربى. نحن نعلم حاليًا أن نواة ذرة الليثيوم المستقرة تتكون من ثلاثة بروتونات وأربعة نيوترونات مرتبطة معًا بالقوة النووية القوية. إن أغلب البروتونات فى شعاع مسارع كوكروفت ووالتون تمر عبر الحيز الخالى تقريبًا بين أنوية الليثيوم، وتزيح من طريقها الإلكترونات جانبًا. لكن بعض البروتونات فقط هى التى تصطدم مباشرة بأهدافها النووية، وطبقًا لتوقع جامو، فإنها تشق نفقًا إلى النواة. وفى كل حالة، تكون النتيجة نواة تحتوى على أربعة بروتونات وأربعة نيوترونات (نظير عنصر البريليوم). لكن هذا النظير غير مستقر بالمرة بحيث يتفكك مباشرة تقريبًا بمجرد أن يتكون إلى جسيمَىْ ألفا (أنوية هليوم)، يحتوى كل جسيم على بروتونين ونيوترونين. وتتحول الكتلة إلى طاقة فى هذه العملية، ويندفع جُسَيْما ألفا من طبقة الليثيوم بقوة، ويمكن بالتالى رصدهما بسهولة.

وقد وصفت الصحافة العامة لتلك الأيام، وحتى الآن أحيانًا، تجربة كوكروفت ووالتون بأنها «انشطار» للذرة، وكأن البروتونات الطائرة نسفت ببساطة أنوية الليثيوم، مثلما تهدم قذيفة مدفع جدارًا حجريًا. لكن هناك معنى ودلالة أكثر عمقًا فى كون أن النواة الذرية التى انشطرت هى بالفعل نواة «بريليوم» غير مستقرة، تكونت، حتى وإن كان ذلك بشكل عابر - نتيجة «اندماج» بروتون مع نواة ذرة ليثيوم. وبالتالى أمكن

مشاهدة تأثير النفق عمليًا فى معمل كافنديش، ولن يستطيع أحد بعد ذلك أن يشكك فى أن هذا التأثير نفسه يحدث أيضًا فى قلب الشمس. لكن ما الأنوية الذرية التى يعمل عليها؟

إناء الضغط الشمسى

طول الثلاثينيات من القرن العشرين، أعاق الاعتقاد الخاطئ حول مكونات الشمس محاولات علماء الفيزياء الفلكية للوقوف على الدورة الصحيحة لتفاعلات الاندماج التى تحافظ على حرارة الشمس. لقد أقنعهم أنسولد ومكريا بأن هناك قدرًا كبيرًا من الهيدروچين فى الشمس (فى غلافها الجوى على الأقل)، ومن ثَم فقد كانوا يعلمون باحتمال وجود العديد من البروتونات المتاحة داخل الشمس، وبمستويات الطاقة المناسبة للمشاركة فى نوع التفاعلات التى أثبتها كوكروفت ووالتون فى معمل كافنديش (والتى سرعان ما تم إثباتها فى معامل عديدة فى الولايات المتحدة وأماكن أخرى). إن التناول الرائد لإدينجتون الذى استخدم معادلات الفيزياء القياسية التى تبين كيفية انتقال الحرارة إلى الخارج من داخل كرة من الغاز مثل الشمس، أثبت أن تدفق الحرارة، وبالتالى استقرار كرة الغاز، يتوقف على المواد التى يتكون منها النجم. إن الإشعاع الكهرومغناطيسى يتفاعل بقوة مع الجسيمات المشحونة، مثل الإلكترونات والبروتونات، وطبقًا لهذه الحسابات فإن نجمًا كالشمس لا يستقر إلا إذا كان يحتوى على الخليط الصحيح من الإلكترونات والأنوية. فإذا كان عدد الجسيمات المشحونة كبيرًا جدًا فإنها ستحتفظ بالإشعاع فى داخل النجم مما سيجعله ينتفخ، أما إذا كانت قليلة جدًا فإن الإشعاع سيتسرب بسهولة شديدة بحيث ينكمش النجم كالبالون المثقوب. ويوجد فارق بين كون البروتونات حرة، كما فى أنوية الهيدروچين، أو متجمعة معًا كما فى أنوية الحديد، ٢٦ بروتونًا فى كل نواة (بالإضافة إلى العدد المناسب من النيوترونات، وهو ٣٠ نيوترونًا فى أغلب أشكال الحديد المستقر). وكان أناكزاجوراس قد افترض أن الشمس تتكون من حديد ساخن. إن عدد الإلكترونات هو دائمًا نفس عدد البروتونات بالنسبة لنفس الكتلة الكلية للشمس. فإذا كانت كل الأنوية بروتونات بسيطة، فإن عدد الإلكترونات يكون كبيرًا جدًا، أما إذا كان قسم كبير من الكتلة محتجزًا على صورة نيوترونات، فإن عدد الإلكترونات يكون أقل بكثير (بالنسبة لشمس تتكون من حديد صافٍ فإن البروتونات تمثل أقل من نصف كتلتها، ويتكون الباقى من النيوترونات،

وبالتالى يكون عدد الإلكترونات الحرة فى هذه الحالة أقل من نصف عدد الإلكترونات فى حالة شمس تتكون من هيدروچين صاف).

وللأسف، أثبتت الحسابات أن كرة بحجم الشمس وبدرجة حرارتها ومعدل توليدها للطاقة، لا يمكن أن تستمر كنجم مستقر إلا إذا كانت نسبة الهيدروچين داخلها لا تقل عن ٣٥٪ تقريبًا «أو» ٩٥٪ (تتكون الشمس بالفعل من ٩٥٪ على الأقل من الهيدروچين «والهليوم»، مع احتمال ضعيف جدًا لوجود أى عناصر ثقيلة). ومرة أخرى، ظهر خطأ ما «يعرفه الجميع»، لقد شوه الأفكار عن الشمس وكبح التقدم. كان «الجميع يعتقدون» أن تركيب الشمس أشبه بتركيب الأرض، إلى أن أثبت أنسولد ومكريا أن الأمر مختلف تمامًا. وحتى عندما عرف الجميع أن هناك كميات كبيرة من الهيدروچين فى الشمس، وأن قوانين الفيزياء تقول ان «كميات كبيرة» تعنى إما ٣٥٪ هيدروچين و٦٥٪ عناصر ثقيلة، أو أن نسبة العناصر الثقيلة أقل من ٥٪، كان من «المسلم به» أن تكون نسبة الهيدروچين الأقل هى الصحيحة لأنها الأقرب لما كان يعرفه الجميع من قبل. وبالتالى بدأ المنظِّرون البحث عن طرق تستطيع بها البروتونات أن تندمج مع أنوية أثقل لإنتاج أنوية غير مستقرة بحيث تلفظ هذه الأنوية جسيمات ألفا وتتحرر طاقة، كما حدث بالنسبة «لانشطار» ذرات الليثيوم أثناء تجربة معمل كافنديش التى قام بها كوكروفت ووالتون.

ولقد شوه هذا التصور الخاطئ أعمال روبرت أتكينسون، عند تطويره للأفكار التى قدمها أول الأمر بالتعاون مع هوترمنز. ففى عام ١٩٣١، افترض إمكان تفسير كل من نسب العناصر المختلفة داخل النجوم وعملية توليد الطاقة فيها إذا كانت الأنوية الثقيلة تمتص بروتونات متتالية وتلفظ أنوية هليوم - لكنه كان يعتقد حينئذ أن نجمًا مثل الشمس يحتوى على ٣٥٪ فقط من الهيدروچين. وفى عام ١٩٣٦، وبالرغم من هذه التصورات الخاطئة التى أعاقته، أثبت أن التفاعل الوحيد الأكثر حدوثًا فى قلب الشمس هو تصادم بروتونين لتكوين ديوترون (نواة تحتوى بروتونًا واحدًا ونيوترونًا واحدًا) وبوزيترون. وكانت الخطوة التالية هى إثبات الطريقة التى بواسطتها تقوم بعض النجوم، على الأقل، باستخلاص الطاقة النووية.

ومرة أخرى يتدخل چورچ جامو فى القصة. ففى أبريل ١٩٣٨، نظم مؤتمرًا فى واشنطن، ضم علماء الفلك والفيزياء، لمناقشة مشكلة توليد الطاقة داخل النجوم. وكان

من بين العلماء باحث شاب فى مجال الفيزياء النووية هو هانز بيث (Hanz Bethe)، الذى كان يتميز بفهم شامل للظروف التى يتعين توافرها حتى تنفذ البروتونات إلى أنوية ذات كتلة أكبر، لكنه لم يكن مدركًا لمشكلات الفيزياء الفلكية. ولد بيث عام ١٩٠٦ فى ستراسبورج (التى كانت فى ذلك الوقت جزءًا من ألمانيا، وهى حاليًا جزء من فرنسا) وعمل فى عدد كبير من الجامعات الألمانية قبل أن ينتقل إلى بريطانيا فى عام ١٩٣٣ (عندما تولى هتلر السلطة) ثم إلى الولايات المتحدة فى عام ١٩٣٥، حيث عمل فى جامعة كورنيل بنيويورك.

وفى عام ١٩٣٨، أدرك علماء الفيزياء الفلكية أن طاقة النجوم لا بد أن تنبع من عمليات نووية، لكنهم لم يتوصلوا إلى نوع هذه العمليات النووية. ومن السهل تلخيص المشكلة، باستخدام مثالين؛ أولاً، أن التفاعل التقليدى بين أنوية الهيدروچين وأنوية الليثيوم ـ الذى قام به كوكروفت ووالتون ـ فعَّال أكثر مما يلزم لتفسير كيفية احتفاظ الشمس بحرارتها.لأنه لو كانت هناك كمية كبيرة جدًا من الليثيوم فى قلب الشمس فسرعان ما تتحول إلى أنوية هليوم، ولو عند درجة حرارة ١٥ مليون درجة، محررة بذلك طاقة هائلة وبسرعة كبيرة، قد تؤدى إلى انفجار الشمس ذاتها. كما أن التفاعلات بين البروتونات وأنوية الأكسچين (مثلاً) أبطأ بكثير مما ينبغى، عند درجات الحرارة تلك، بحيث لا تستطيع أن تنتج الكمية المناسبة من الطاقة بشكل مستقل. ولو كانت الشمس تعتمد على مثل هذه التفاعلات، فإنها قد تنكمش حتى تصبح ساخنة فى المركز بحيث يزيد ذلك من سرعة التفاعلات. وتساءل بيث والعلماء الآخرون فى المؤتمر عن التفاعل النووي. أو مجموعة التفاعلات، التى يمكن أن تتم بالمعدل المناسب عند درجة حرارة قلب الشمس لإنتاج كمية الطاقة التى تشعها حاليًا.

ويصف جامو فى كتابه «ميلاد وموت الشمس»، الذى ألفه مباشرة بعد هذه الأحداث، كيف قرر بيث أنها ليست بالمشكلة المستعصية على الحل، وكيف أعلن أنه سيكشف سر طاقة النجوم أثناء رحلة عودته لكورنيل بالقطار. تروى الأسطورة كيف عاهد بيث نفسه على حل المشكلة قبل جلوس الركاب لتناول العشاء ـ وفعلاً كان له ذلك وقبل الموعد بثوان. وفى الوقت نفسه، فى بداية عام ١٩٣٨، توصل باحث ألمانى آخر، هو كارل فون ڤيزسكر (Carl von Weizäcker) إلى نفس حل مشكله طاقة النجوم لكن فى برلين. غير أن ما كان ينقصه وجود عالم متحمس مثل جامو ليبرز الاكتشاف، بإزاحة

الستار عن حسابات متعجلة وسريعة اجريت ريثما يُعد العشاء فى القطار (وهناك شكوك فى صحة هذه القصة ولو جزئيًا).

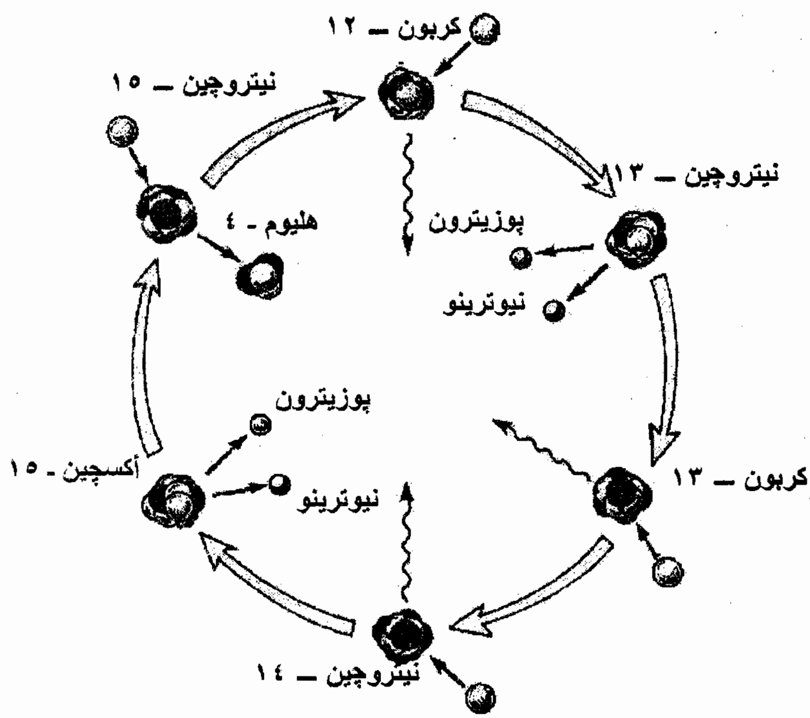
كيمياء النجوم

إن عملية توليد الطاقة فى نسختها الحديثة، والتى لم يطرأ عليها سوى تحسينات طفيفة منذ عام ١٩٣٨، تُسمى دورة الكربون، أو دورة كربون - نيتروچين - أكسچين (CNO). وهى تعمل كما يلى :

أولاً، يشق بروتون نفقًا إلى نواة تحتوى ستة بروتونات وستة نيوترونات (نواة ذرة كربون - ١٢). والنواة الناتجة عن هذا الاندماج هى نواة نيتروچين - ١٣، وهى مشعة، وينطلق منها بوزيترون ونيوترينو، وتتحول إلى نواة كربون - ١٣. وإذا شق بروتون آخر الآن نفقًا إلى هذه النواة، فإننا نحصل على نواة نيتروچين - ١٤، أما إذا شق بروتون ثالث نفقا إلى نواة النيتروچين - ١٤ فإنها تتحول إلى نواة أكسچين - ١٥، وهى مشعة أيضًا، وينطلق منها بوزيترون ونيوترينو، وتتحول إلى نواة نيتروچين - ١٥ (يتوقف «اسم» النظير، فى كل حالة، على عدد البروتونات التى يحتويها، كما يتوقف «رقمه» على إجمالى عدد البروتونات والنيوترونات). لكن إذا شق الآن بروتون آخر نفقًا إلى نواة النيتروچين - ١٥، فإنها تلفظ جسيم ألفا، أى بروتونين ونيوترونين مرتبطين معًا لتكوين نواة هليوم.. وما يتبقى بعد ذلك هو نواة كربون - ١٢، وهو بالضبط ما بدأت به الدورة. وعبر العملية، تتحد أربعة بروتونات لتكون نواة هليوم، وينطلق اثنان من البوزيترونات واثنان من النيوترينات ويتحرر كم هائل من الطاقة عبر هذه العملية. وتقوم كمية صغيرة نسبيًا من الكربون - ١٢ فى قلب النجم بدور العامل الحفَّاز لعدة دورات من هذا النوع (شكل ٤ - ٣)، حيث يتحول الهيدروچين بشكل مُطَّرد إلى هليوم وتتحرر طاقة تكفى للحفاظ على النجم ساخنًا - ومع ذلك، فإن الكمية الكلية للكربون والنيتروچين والأكسچين داخل النجم تظل دون تغيير (ولو كان بيث قد اكتشف ذلك فعلاً فى القطار قبل العشاء، فإنه جدير بكل ما نسبه جامو إليه من فضل وثقة).

إن هذه العملية تفسر بشكل جيد الطريقة التى تظل بها نجوم كثيرة ساخنة. لكن ثبت فى النهاية أنها «ليست» أهم عمليات توليد الطاقة داخل الشمس. ومع تحسين علماء الفيزياء الفلكية لحساباتهم، وحصول زملائهم فى مجال مراقبة النجوم ورصدها على تقديرات أكثر دقة عن كتل النجوم ودرجة جلائها، أصبح من الواضح أن دورة

الكربون هى مصدر الطاقة الغالب فى النجوم التى تبلغ كتلتها مرة ونصف كتلة الشمس، وبالتالى تكون درجة حرارتها الداخلية أعلى، لكن لا يمكن لهذه الدورة سوى إنتاج كمية متواضعة من الطاقة عند درجات الحرارة داخل الشمس. ولم يؤد إدراك ذلك إلى إرباك علماء الفيزياء الفلكية، لأن بيث كان قد اكتشف آنذاك العملية النووية التى تحتفظ للشمس حرارتها.

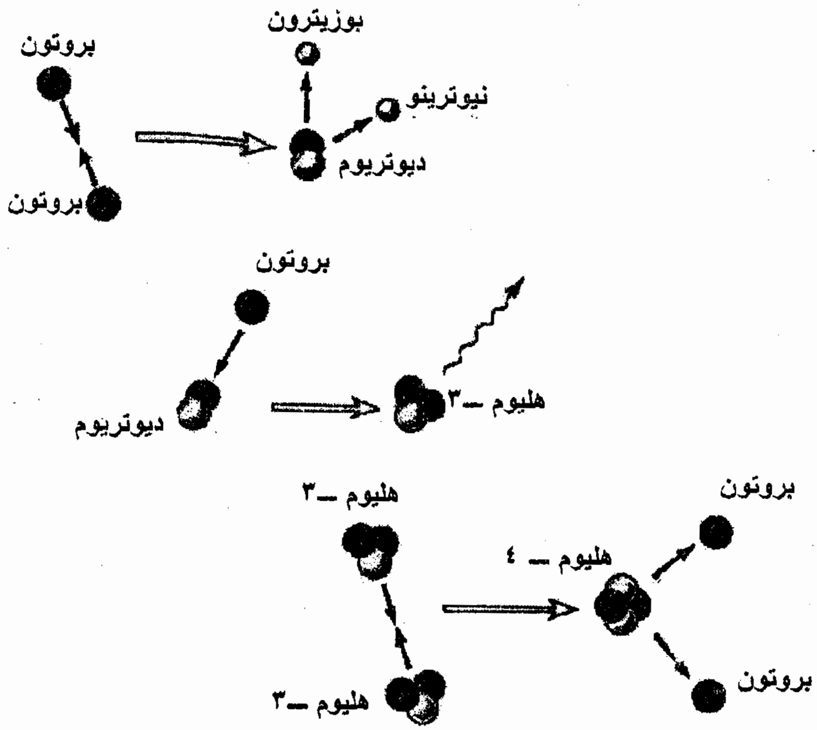


شكل (٤ - ٣): إذا كان داخل النجم كمية ولو قليلة من الكربون - ١٢، وكانت درجة الحرارة مناسبة، عندئذ يتحول الهيدروچين إلى هليوم وتتحرر الطاقة من خلال دورة كربون ـ نيتروچين ـ أكسچين. ابدأ بأعلى الرسم واتبع الأسهم فى اتجاه عقارب الساعة، كل جسيم قادم من خارج الدائرة هو بروتون، والنتيجة النهائية هى تحويل أربعة بروتونات (أنوية هيدروچين) إلى جسيم ألفا واحد (نواة ذرة هليوم ـ ٤) بينما يُعاد تكوين نواة الكربون من جديد. الخطوط الموجية تشير إلى أشعة جاما.

هذه المرة، لم تكن هناك رحلة قطار، إنما عمل مستقر فى جامعة كورنيل، مع شارل كريتشفيلد (Charles Critchfield) زميل بيث. وقد نُشرت لأول مرة فى عام ١٩٣٨ أبحاثهما عما عُرف فيما بعد بسلسلة البروتون ـ البروتون، لكن علماء الفيزياء الفلكية لم يتمكنوا حتى الخمسينيات من الجزم بأن تلك السلسلة هى التى تنتج أغلب طاقة الشمس وليست دورة الكربون (وكان اختلاط الأمر فيما يتعلق بالمواد المكونة للشمس من أهم الأسباب التى جعلت

العلماء يستغرقون كل هذا الوقت للتأكد . لقد أصبح كل شىء متسقًا بمجرد إدراك أن الشمس تتكون فعلاً من أكثر من ٩٥٪ من الهيدروچين والهليوم، والتقدير الحديث يعتبر أن الشمس تتكون من ٧٠٪ هيدروچين، و٢٨٪ هليوم، و٢٪ فقط عناصر ثقيلة).

تبدأ سلسلة البروتون ـ بروتون (P - P) بالتفاعل الذى عرَّفه أتكينسون بأنه نقطة البداية للاندماج النووى داخل النجوم، وهو الاصطدام بين اثنين من البروتونات حيث يسمح لهما تأثير النفق بالاقتراب بدرجة كافية ليندمجا معًا ويكونا ديوترونًا، وينطلق من هذه العملية جسيم نيوترينو وجسيم بوزيترون. وعندئذ يستطيع بروتون آخر أن يشق نفقًا نحو الديوترون وينتج من ذلك نواة ذرة هليوم ـ ٣، تحتوى على بروتونين ونيوترون واحد. وفى النهاية، عندما تتصادم نواتا هليوم ـ ٣ فإنهما تكونان نواة هليوم ـ ٤ مستقرة، وينطلق من التفاعل بروتونان (شكل ٥ ـ ٣).



شكل (٥ – ٣): إن شمسنا ليست ساخنة بما يكفى لتغذيتها بالطاقة بواسطة دورة الكربون ـ نيتروچين – اكسچين، وإن كانت هناك نجوم أخرى درجة حرارتها تفى بالغرض. إن شمسنا تحصل على طاقتها من عملية اندماج أخرى، سلسلة البروتون – بروتون. وبفضل تأثير النفق يستطيع اثنان من البروتونات أن يتحدا داخل الشمس ليكونا ديوتريوم، الذى يتكون منه فى البداية هليوم – ٣ ثم هليوم – ٤. لكن حتى فى قلب الشمس، يندر وجود الجسيمات السريعة التى تستطيع أن تستفيد من تأثير النفق وتندمج بهذه الطريقة.

حوالى ٩٥٪ من أنوية الهليوم ـ ٣ تلقى هذا المصير، أما الـ ٥٪ المتبقية فإن لـ الخيار بين مصيرين مختلفين قليلاً، سنعلم عنهما المزيد فى الفصل الرابع. وكما فى دورة الكربون ـ نيتروچين ـ أكسچين، فإن النتيجة النهائية هى تحول أربعة بروتونات إلى نواة هليوم – ٤، وانطلاق طاقة. ولما كانت دورة الكربون تحتاج ـ كما نعرف الآن ـ إلى درجات حرارة أعلى من ٢٠ مليون درجة لكى تعمل بكفاءة، فإن سلسلة البروتون ـ بروتون (P - P.) هى مصدر فعال للطاقة حتى عند درجة حرارة منخفضة لا تتجاوز ١٥ مليون كلفن.

من الصعوبة بمكان وضع كل ذلك فى إطار حياة يومية؛ فإن درجات حرارة مثل ١٥ مليون كلفن وكثافات تُقدر بعدة أضعاف كثافة الرصاص ليست شيئًا مألوفًا لنا. لكن من المفيد أن نحاول توضيح بعض سمات هذه التفاعلات النووية (والتى ستجعلكم تقدِّرون ما يواجهه المهندسون فى محاولة إعادة عمليات الاندماج كمصدر للطاقة فى محطات القوى هنا على الأرض).

أولاً : تبين حسابات تأثير النفق أن تفاعل بروتون ـ بروتون الأساس الذى يبدأ السلسلة، لا يحدث حتى عند درجة حرارة ١٥ مليون كلفن إلا إذا كانت البروتونات المتصادمة تسير بسرعة تزيد ٥ أضعاف عن المتوسط، أى تقع فى ذيل السرعة العالية فى توزيع السرعة. وحتى إذا توافر هذا الشرط فإن التصادم يجب أن يكون أماميًا ومباشرًا تقريبًا ـ لأن البروتون السريع الذى يضرب بروتونًا آخر ضربة عرضية أو غير مباشرة لن يكون قادرًا على شق نفق عبر الحاجز الكهربى. وفى داخل الشمس، يسير بروتون واحد من كل مائة مليون بروتون بسرعة تكفى لأن يحدث تصادم أمامى مباشر بحيث تتم العملية. وما لم يلفظ أحد البروتونين المتفاعلين بوزيترونًا أثناء الجزء الصغير من الثانية الذى يكونان فيه ضمن مدى شق النفق بالنسبة لبعضهما البعض، فإنهما لن يكوِّنا ديوترونًا مستقرًا ـ إن «نواة» تتكون من بروتونين فقط ليست مستقرة بذاتها. إن كل بروتون فى قلب الشمس يدخل فى تصادم مع بروتونات أخرى ملايين المرات كل ثانية. وبالرغم من ذلك، فإن حسابات الكم تبين أن البروتون الواحد قد يستغرق فى المتوسط ١٤ مليار عام للعثور على شريك قادر على الاتحاد معه وتكوين ديوترون عبر تصادم أمامى مباشر. وقد تستغرق بعض البروتونات وقتًا أطول من المتوسط، بينما قد يعثر البعض الآخر على شركائه بسرعة أكبر. يُقدر عمر الشمس بحوالى ٤,٥ مليار عام فقط – ولذلك فإن أغلب بروتوناتها لم تعثر بعد على شركائها.

لكن بالرغم من أن تصادمًا واحدًا من كل ١ × ١٠^٢٢ تصادم هو الذى يستهل سلسلة البروتون - بروتون، وهو ما يمثل معدل تفاعل بطيئًا بدرجة لا تصدق، ومع أن ٧ ,٪ فقط من كتلة كل مجموعة من أربعة بروتونات تتحول إلى طاقة عند تكون نواة هليوم - ٤، فإن حوالى «خمسة ملايين» طن من المادة تتحول فى كل ثانية إلى طاقة داخل الشمس، وذلك نظرًا للعدد الهائل من البروتونات داخل الشمس. وحتى يومنا هذا حولت الشمس ٤٪ فقط من مخزونها الأصلى من الهيدروچين إلى هليوم، رغم أن تفاعلات بروتون - بروتون ظلت مستمرة بشكل مطَّرد لمدة ٤,٥ مليار عام.

إن هذه الإحصائيات تصل بنا إلى نهاية القصة التى بدأتها فى أول هذا الفصل لأكشف لكم سر بقاء الشمس ساخنة. ولكن قبل الانتقال إلى أسرار أخرى للشمس تجدر الإشارة، ولو باختصار، إلى كيف أن تفاعلات نووية أكثر تعقيدًا حدثت داخل نجوم أخرى، منذ زمن بعيد، تفسر وجودنا الآن على الأرض.

الغبار النجمى(*)

لدى علماء الفلك الآن دليل جيد على أن سحب الغاز التى تكونت منها النجوم فى أول الأمر، بعد الانفجار العظيم الذى ولد منه الكون، لا تحتوى إلا على هيدروچين وهليوم (حوالى ٢٥٪ هليوم) مع آثار قليلة من عناصر خفيفة أخرى. أما كل ما عدا ذلك فقد صُنع داخل النجوم.

المرحلة الأولى هى مرحلة تحويل الهيدروچين إلى هليوم. وهى تؤثر على طبيعة النجم الذى «احترق» فيه الهيدروچين، وطبقًا لحسابات علماء الفيزياء الفلكية، فقد غير هذا التحول حجم شمسنا ومظهرها على امتداد الـ ٤,٥ مليار عام السابقة. نظرًا لأن كل نواة منفردة تعمل مثل جسيم مستقل داخل «الغاز» فى قلب الشمس، ففى كل مرة تتحد فيها أربعة بروتونات لتكوين نواة هليوم يتناقص عدد الجسيمات المشاركة فى ضغط الغاز، الذى يجعل الشمس تتماسك، بمعدل ثلاثة جسيمات. وينخفض نتيجة لذلك ضغط الغاز ببطء، ومن ثَم ينكمش قلب الشمس قليلاً ويصبح أكثر حرارة، وعندئذ يعوض ضغط الإشعاع الإضافى مقدار النقص الحاصل فى ضغط الغاز بالضبط. لكن انكماش قلب الشمس وارتفاع حرارته يعنى أن تتمدد الطبقات

(*) كتل من النجوم تبدو بالغة الصغر وكأنها ذرات الغبار. (المترجم).

«الخارجية» للشمس قليلاً، حيث تصبح أعلى حرارة نتيجة لزيادة تدفق الطاقة النابعة من القلب. وعلى امتداد حياتها وحتى الآن زاد سطوع الشمس بحوالى ٤٠٪. وعندما يبلغ عمرها ستة مليارات عام، أى بعد حوالى ١,٥ مليار عام، ستكون الشمس أكثر سطوعًا بنسبة ١٥٪. إن لذلك تداعياته المهمة بالنسبة للحياة على الأرض ـ فسيصبح مناخ النرويج كمناخ شمال أفريقيا، بشرط ثبات باقى العوامل، ولن يكون هناك فى القطب أنهار جليدية. لكن سيظل من الممكن على الأقل التعرف على الشمس.

لكن بعد ستة مليارات عام من الآن، عندما يبلغ عمر الشمس أكثر من عشرة مليارات عام، سيختلف شكل الشمس بحيث يصعب التعرف عليها. عندئذ، سيكون أغلب الهيدروچين فى قلبها قد تحول إلى هليوم، وبالرغم من وفرة الهيدروچين الموجود فى الجزء الخارجى من النجم، فإن هذه المناطق ليست ساخنة بما يكفى لتشغيل عملية البروتون ـ بروتون. وبدون حدوث اندماج للهيدروچين فى قلب الشمس، سينكمش هذا القلب على نفسه وترتفع درجة حرارته. وتتم عملية حرق الهيدروچين فى غلاف حول القلب المتوهج، مما يجعل الطبقات الخارجية تتمدد إلى أن يصبح حجم الشمس أكثر من ثلاثة أضعاف حجمها الحالى، وبالرغم من أن كمية كبيرة من الطاقة ستتدفق خلال هذا النجم الضخم، فإن هذه الطاقة ستتدفق عبر مساحة سطح شاسعة، ومن ثم سيكون السطح ذاته أبرد عنه حاليًا، ولونه أحمر داكنا. وستصبح الشمس شبه عملاق أحمر، وستستمر فى الانتفاخ ببطء خلال المائتى مليون عام التالية لتصبح عملاقًا أحمر حقيقيًا، حيث يبلغ طول قطرها مائة ضعف طوله الحالى وتبتلع عطارد، أقرب كوكب للشمس.

لكن عندئذ، سيحدث، طبقًا لحسابات علماء الفيزياء الفلكية، تغير آخر مثير. فطوال كل هذا الوقت، كانت درجة الحرارة ترتفع فى قلب الشمس، وعندما تبلغ حوالى مائة مليون كلفن يبدأ نوع جديد من الاندماج النووى، ألا وهو احتراق الهليوم، ويبدأ احتراق الهليوم فى شكل وهج، وينطلق من هذا التفاعل قدر هائل من الطاقة؛ حتى إن الطبقات الخارجية لهذا النجم العملاق تنفجر فى الفضاء، ويستقر القلب ليبدأ حياة جديدة كنجم يعتمد على احتراق الهليوم ـ وهو ما سيأخذنا إلى الخطوة التالية على طريق خيمياء النجوم.

إن أنوية الهليوم ـ جسيمات ألفا ـ لا تستطيع أن تتحد فى شكل أزواج لتكوين نواة مستقرة أخرى. إن النواة التى تتطابق مع نواتين متحدتين من الهليوم ـ ٤ هى نواة بريليوم ـ ٨ . وكما أشار كوكروفت ووالتون، فإن البريليوم – ٨ غير مستقر «على

الاطلاق». والطريقة الوحيدة الممكنة لاستخدام أنوية هليوم ـ ٤ فى بناء شىء أكثر تعقيدا هى أن يصطدم جسيم ألفا ثالث مع نواة بريليوم ـ ٨ أثناء فترة حياتها المتناهية القصر ـ أى خلال واحد على (١٠)١٤ من الثانية عقب اصطدام أول جسيمَىْ ألفا. وبالرغم من غرابة حدوث ذلك فإنه يحدث، وبدرجة كافية لكى يكون احتراق الهليوم مصدرًا رئيسًا للطاقة فى النجوم السابقة لشمسنا فى القافلة التطورية. والناتج النهائى لهذه التفاعلات هو الكربون ـ ١٢، وهى نواة مستقرة.

وتحدث عمليات اندماج أخرى عند درجات حرارة أعلى فى النجوم الأكثر تطورًا (تتطور النجوم ذات الكتل الأكبر أو تسير عبر دورات حياتها، بسرعة أكبر من النجوم ذات الكتل الأقل، ومن ثم فإن العديد من النجوم فى مجرتنا قد ماتت بالفعل، ومع ذلك فإن شمسنا قد بلغت بالكاد خريف العمر). وبمجرد تكون كربون ـ ١٢ داخل النجم، يصبح من السهل نسبيًا لجسيم ألفا آخر أن يشق نفقًا إلى النواة، لينتج أكسچين ـ ١٦. وبالتالى يكون الناتج النهائى لاحتراق الهليوم هو خليط من أنوية الكربون والأكسچين. ويحدث «احتراق الكربون» عند درجة حرارة ٥٠٠ مليون كلفن تقريبًا (بعد أن يكون القلب قد انكمش على نحو ملائم)، وعندئذ يتفاعل زوج من أنوية الكربون لإنتاج خليط من النواتج تضم أنوية نيون، وصوديوم، وماغنسيوم. أما «احتراق الأكسچين»، الذى يحدث عند درجة حرارة مليار كلفن، فينتج عنه أنوية سليكون وكبريت وعناصر أخرى. ويُعد أهم ناتج للتحول المشترك للأكسچين والكربون هو السليكون ـ ٢٨، الذى يُعد العنصر الرئيس فى آخر مرحلة من عملية توليد الطاقة عن طريق الاندماج النووى وهى الأكثر تعقيدًا.

إن «احتراق» السليكون، فى الواقع، أكثر تعقيدًا من مجرد الاتحاد بين اثنين من أنوية السليكون – ٢٨ لتكوين نواة حديد – ٥٦. إن جسيمات ألفا تنفصل، فى الواقع، من نواة وترتبط بالنواة الأخرى، بواقع جسيم فى كل مرة. ولكن النتيجة النهائية هى نفسها ـ يتحول السليكون إلى حديد. وعلى امتداد الطريق من الهليوم إلى الحديد، فإن العناصر التى تنتج بكميات كبيرة بواسطة هذه الخيمياء النجمية، هى، فى الواقع، مجموعات من جسيمات ألفا، ذات كتل تساوى تقريبًا أربعة أضعاف كتلة البروتون (هذا على وجه «التقريب» – وتذكر أن كل القضية تكمن فى تحول بعض الكتلة إلى طاقة فى كل مرحلة). وتلفظ بعض هذه الأنوية بوزيترونًا عندما يتحول بروتون إلى نيوترون وصولاً إلى وضع أكثر استقرارًا، لكن ذلك لا يغير رقم الكتلة كثيرًا، نظرًا لأن كتلة البوزيترون (أو الإلكترون) لا تزيد على واحد على ألفين تقريبا من كتلة النيوترون أو البروتون. إن

العناصر التى لا تساوى أرقام كتلتها مضاعفات أربعة تتكون نتيجة استيلاء أنوية هذه العناصر على نيوترونات ضالة من البيئة المحيطة، وعندئذ قد تلفظ إلكترونات لتحويل بعض هذه النيوترونات الإضافية إلى بروتونات. لكن كل شىء يتوقف عند الحديد ـ ٥٦، فأنويته هى أكثر ترتيبات البروتونات والنيوترونات استقرارًا. وللحصول على أنوية ذات كتلة أكبر - مثل الرصاص أو اليورانيوم أو الذهب - يتعين تزويد الأنوية بطاقة تدفع الجسيمات الإضافية بالقوة نحو النواة.

وبدلاً من أن تكون كل نواة أخف من مجموع الأجزاء المكونة لها، فإن إضافة جسيم ألفا أو نيوترون إضافى يجعل النواة الجديدة أثقل من مجموع أجزائها، حيث إن الطاقة اللازمة لدفع الجسيمات معًا بالقوة تحولت إلى كتلة.

إن الطاقة الإضافية لا تكون متاحة إلا فى المراحل الأخيرة من حياة عدد قليل من النجوم الثقيلة. عندما ينفد الوقود النووى من تلك النجوم، فإن قلبها ينهار، ويسحب البساط من تحت أقدام الطبقات الخارجية، التى لم يعد يدعمها ضغط إشعاع أو ضغط غاز. وبينما تندفع هذه الطبقات بعنف وسرعة إلى الداخل على القلب المتوهج للنجم، فإن طاقة جاذبية ضخمة تتحرر ولا تدفع هذه الطاقة فقط أنوية العناصر الأخف كتلة من الحديد ـ ٥٦ بالقوة معًا لتكوين أنوية أكبر كتلة، لكن النجم كله يتفجر عندئذ إلى الخارج، وتنبعثر العناصر التى كوَّنها النجم فى الفضاء بين النجوم. ويُسمى مثل هذا النجم المتفجر «سوبرنوفا»، ولتصور كمية هذه الطاقة فإن السوبرنوفا يمكن أن تلمع، مؤقتًا، بدرجة سطوع مجرة كاملة من النجوم ـ تضم المجرة عشرات المليارات من النجوم مثل شمسنا. لكن الشمس نجم متواضع جدًا فلن تلقى هذا المصير أبدًا ـ فعندما ينفد وقودها النووى، ستتخذ بهدوء شكل كتلة فاترة من مادة النجم التى تتكون أساسًا من الحديد شديد التوهج حتى الابيضاض، وتخبو الشمس وصولاً إلى الشيخوخة مثل النجوم المسماة بالقَزَم الأبيض. إن تخمين أناكزاجوراس فيما يتعلق بتكوين الشمس كان يمكن أن يصح لو كان هو قد ولد بعد ذلك بعدة مليارات من السنين. لكن حتى أناكزاجوراس لم يتخيل قط أنه هو نفسه خُلق من غبار نجمى.

إن «كل» العناصر فيما عدا الهيدروچين والهليوم (بل حتى بعض الهليوم) تم تصنيعها داخل النجوم. لكن هذه العناصر لا تفلت إلا من نوع واحد من النجوم هى السوبرنوفا. إن كتلة مجرتنا، مجرة درب اللبانة، تُقدر بحوالى ١٠٠ مليار ضعف كتلة شمسنا، ويقدر علماء الفلك، بناء على دراسات للتحليل الطيفى للنجوم، أن ١٪ فقط من هذه المادة، أى

مليار مرة كتلة الشمس، تكون فى شكل عناصر ثقيلة (وكلمة «ثقيلة» تعنى أى عنصر آخر بخلاف الهيدروچين والهليوم). وبما أن عمر المجرة يُقدر بحوالى عشرة مليارات عام، فإن ذلك يعنى أن كتلة ما يتحول إلى عناصر ثقيلة كل عام تساوى ١٠٪ من كتلة نجم مثل الشمس، مما يسمح للبعض أن يتصور احتمال حدوث انفجارات السوبرنوفا بصفة أكثر تكرارًا عندما كانت المجرة أكثر شبابًا، وهو ما يتطلب انفجار سوبرنوفا واحدة، كل ثلاثين عامًا الآن تقريبًا، ويطلق كل انفجار كتلة من المواد المعالجة فى الفراغ تعادل ضعف كتلة شمسنا. وينتج عن السوبرنوفا غبار نجمى، ويشكل بعض هذا الغبار النجمى فى آخر الأمر سحبًا من الغاز تنهار مكونة نجومًا وكواكب جديدة. إن ذلك هو مصدر العناصر الثقيلة على الأرض وفى الشمس، التى هى نجم شاب نسبيًا. إن السليكون الموجود فى الحاسوب الذى أستخدمه لكتابة هذه الكلمات تكوّن داخل نجم عند درجة حرارة قدرها مليار درجة، وقذف به بعد ذلك فى الفضاء عند انفجار هذا النجم. لن يحدث ذلك قط لشمسنا، لأن كتلتها ليست كبيرة بما يكفى. لكن فى الستينيات من القرن العشرين، بدا لعلماء الفيزياء الفلكية أن بإمكانهم وصف تركيب الشمس من الداخل إلى الخارج، حتى دون أن يتمكنوا من رؤية ما بداخلها.

الشمس من الداخل إلى الخارج

يوصف تركيب الشمس، المستنتج من حسابات علماء الفيزياء الفلكية فى عقدَى الخمسينيات والستينيات من القرن العشرين، بأنه مجموعة من الطبقات أو الأغلفة، وإن لم يتسن معرفة الشمس بشكل مباشر آنذاك. إن قلب الشمس ـ القلب الذى تتولد فيه الطاقة بواسطة العمليات النووية ـ يمتد إلى ربع المسافة من مركز الشمس إلى سطحها، ويمثل ١,٥٪ فقط من حجم الشمس. لكن تلك هى المنطقة التى يتم فيها نزع الإلكترونات من الذرات حيث تترك الأنوية تتراص معًا لتصل إلى كثافة اثنى عشر ضعف كثافة الرصاص، وإن كانت بالرغم من ذلك تسلك سلوك جسيمات الغاز المثالى. ويعنى ذلك أن نصف كتلة الشمس تتركز فى ذلك القلب الداخلى (تُقدر الكتلة الكلية للشمس، تقريبًا، بـ ٣٣٠ ألف مرة كتلة الأرض، بينما يساوى نصف قطرها ١٠٩ مرات نصف قطر الأرض) وتبلغ درجة الحرارة داخل مركز الشمس، طبقًا للنماذج المعيارية للفيزياء الفلكية، ١٥ مليون كلڤن (وتُقدر درجة الحرارة فى الحافة الخارجية للقلب بحوالى ١٣ مليون كلڤن)، فى حين يبلغ الضغط ٣٠٠ مليار ضعف الضغط الجوى على سطح الأرض. وفى ظل هذه الظروف الصارمة، فحتى الفوتون (كَمٌ من الإشعاع، المُكوِّن

الجسيمى للضوء) لا يستطيع أن ينتقل لمسافة تُقدر بجزء من السنتيمتر الواحد فقط دون أن يصطدم بجسيم مشحون. إن الفوتونات الناتجة عن التفاعلات النووية هى أشعة جاما - وهى تتكون نتيجة «فقدان» الكتلة عند اتحاد أربعة بروتونات لتكوين جسيم ألفا. وعندما يتم امتصاص هذه الفوتونات بواسطة الجسيمات المشحونة، سرعان ما يُعاد إشعاع الطاقة فى شكل أشعة إكس، وعندئذ تبدأ الطاقة الناتجة من الاندماج النووى فى قلب الشمس تأخذ طريقها إلى الخارج عبر الشمس فى شكل أشعة إكس.

ورغم أن كل إشعاع من أشعة إكس يسير بسرعة الضوء، فإنه يفعل ذلك ببطء شديد، بمعنى ما. فعند امتصاص فوتون وإعادة إشعاعه بواسطة جسيم مشحون فى البلازما الساخنة خارج القلب، فإن الإشعاع يمكن أن يكون فى أى اتجاه، بشكل عشوائى، بما فى ذلك العودة من حيث أتى. والنتيجة أنه يتحرك فى مسار عشوائى ومتعرج يُعرف بالسير العشوائى، ويبلغ طول كل خطوة من هذا المسار حوالى سنتيمتر واحد فقط. وعلى امتداد هذا السنتيمتر، يكون الفرق فى درجة الحرارة صغيرًا للغاية فى هذا الجزء من الشمس، الذى يُسمى منطقة الإشعاع. لكن هذا الفرق الصغير يضمن أن عدد الفوتونات التى تشق طريقها إلى الخارج يكون أكثر بقليل من تلك التى تشق طريقها إلى الداخل عند كل مسافة من المركز. ويستغرق الفوتون، فى الواقع، عشرة ملايين عام فى المتوسط لينتقل من مركز الشمس إلى سطحها، فى حين أنه إذا استطاع أن يطير فى خط مستقيم من قلب الشمس إلى سطحها، فإن رحلته لن تستغرق سوى ٢,٥ ثانية. يسير الفوتون، أثناء كل هذا الوقت، بسرعة الضوء - أى أن طول مساره المتعرج يبلغ عشرة ملايين سنة ضوئية. وإذا أمكن جعل الخط المتعرج مستقيمًا، فإنه سيمتد لمسافة أبعد خمسة أضعاف من المسافة التى تفصل مجرة أندروميدا المجاورة لنا، عن مجرتنا، درب اللبانة. ولو نظرنا إلى ذلك بشكل مختلف، فإنه يعنى أن الظروف الحالية على سطح الشمس تماثل ما كان يفعله قلب الشمس منذ عشرة ملايين سنة. لا يمكننا، بمجرد النظر إلى سطح الشمس، التأكد من أن التفاعلات النووية فى قلب الشمس لم تتوقف بالفعل عن تحويل الهيدروچين إلى هليوم فى وقت ما أثناء الخمسة ملايين عام الماضية.

إن منطقة الإشعاع تمتد إلى مسافة مليون كيلو متر تقريبًا، أى ما يمثل ٨٥٪ من المسافة من مركز الشمس حتى سطحها. وكلما اتجهنا إلى الخارج، أصبحت البلازما أقل حرارة وسُمكًا. وفى منتصف المسافة من مركز الشمس إلى السطح، تكون الكثافة مساوية لكثافة الماء، بينما تنخفض فى ثلثى المسافة إلى الخارج لتصل إلى كثافة الهواء

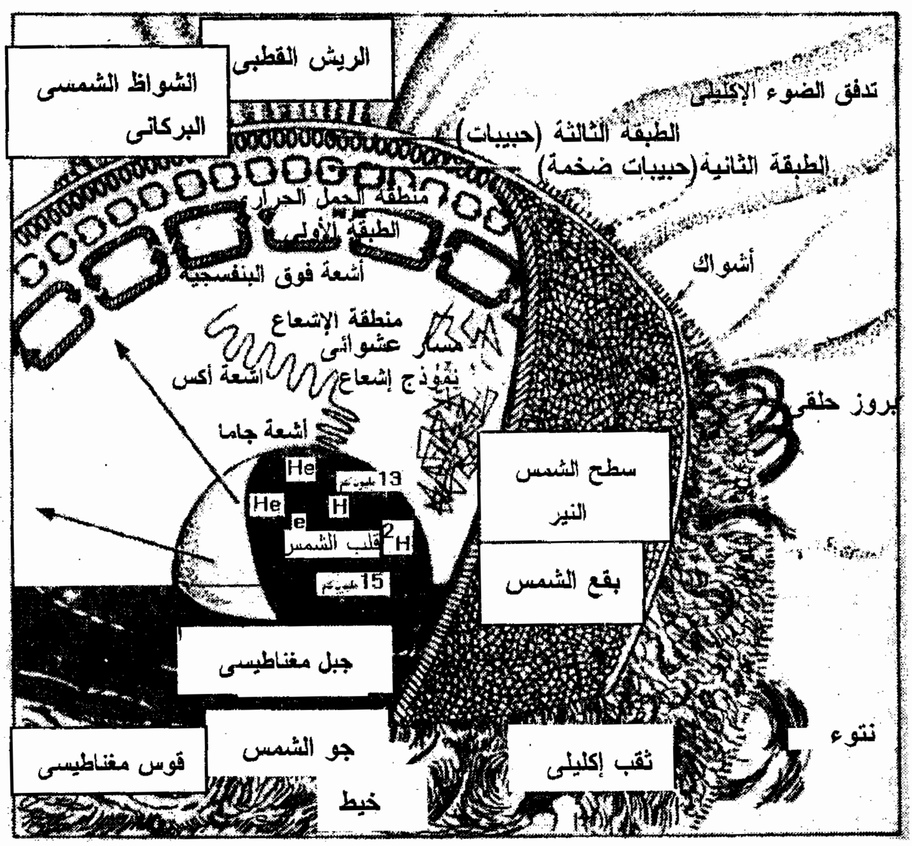
الذى نتنفسه. وعند الحافة الخارجية لمنطقة الإشعاع، تكون درجة الحرارة حوالى نصف مليون كلفن فقط، وكثافة المادة الشمسية لا تتجاوز ١٪ من كثافة الماء (لأن القلب ذا الكثافة العالية صغير جدًا، فإن «متوسط» كثافة الشمس من المركز إلى السطح، يساوى مرة ونصف كثافة الماء). وفى ظل هذه الظروف، تستطيع الأنوية أن تلتصق بسحابة من الإلكترونات، وفى الوقت نفسه تنحط طاقة كل فوتون، لينتقل الإشعاع إلى أطوال موجية أكبر بحيث تتفاعل بشكل أقل عنفًا مع الجسيمات. عند هذه النقطة، تكون ذرات الغاز قادرة على امتصاص طاقة الفوتونات وتحتفظ بها، دون أن تشعها على الفور فى جميع الاتجاهات. إن الطاقة التى تمتصها تلك الذرات تجعلها ساخنة ـ فهى تضطرم بالطاقة، ويُلقى بها فى قاع طبقة تُعرف بمنطقة الحمل الحرارى بواسطة الإشعاع الذى يصطدم، حرفيًا تقريبًا، بجدار من القرميد.

إن مادة منطقة الحمل الحرارى، التى يتم تسخينها من أسفل بهذه الطريقة، تستجيب مثل ماء فى إناء يتم تسخينه من أسفل على موقد. حيث ترتفع المادة الساخنة إلى أعلى عبر المنطقة وتحل محلها مادة أبرد من السطح تهبط إلى الأعماق ـ بمعنى آخر، فإن هذه المنطقة، الملتزمة باسمها، تقوم بالحمل الحرارى (المادة الأقل حرارة التى تهبط لتكملة دورة الحمل الحرارى وتحل محل الغاز الساخن الصاعد، تفقد طاقتها بأن تشع فوتونات عند السطح). ويمتد هذا النشاط المضطرب من عمق ١٥٠ ألف كيلومتر إلى السطح المرئى من الشمس، أى على امتداد الـ ١٥٪ الأخيرة تقريبًا من نصف قطر الشمس. إن سمك منطقة الحمل الحرارى أقل قليلاً من نصف المسافة بين الأرض والقمر، ويُعتقد أنها تتكون من ثلاث طبقات رئيسة للحمل الحرارى، تعلو الواحدة الأخرى.

إن قمة منطقة الحمل الحرارى تتطابق مع السطح المرئى الساطع للشمس. وفى هذه المنطقة الرقيقة جدًا، المسماة بسطح الشمس النيِّر (الفوتوسفير)، تكون درجة الحرارة ٥٨٠٠ كلفن فقط، ولا يزيد الضغط على سدس الضغط الجوى على الأرض، وتكون الكثافة أقل من كثافة الماء بمليون ضعف. وفى ظل هذه الظروف، لا يصبح بمقدور الذرات وقف تدفق الإشعاع نحو الخارج، ومن ثَم تتدفق الفوتونات بحرية إلى الفضاء. ويأتى كل الضوء الذى نراه من هذه الطبقة، التى لا تمثل سوى ٠.١ ٪ من نصف قطر الشمس (٥٠٠ كيلومتر). إن الطاقة فى هذا الضوء سافرت ملايين السنين بسرعة الضوء فى رحلتها المتعرجة عبر منطقة الإشعاع، ثم انتقلت عبر منطقة الحمل الحرارى فى حوالى تسعين يومًا (بسرعة متواضعة قدرها ٧٥ كيلومترًا فى الساعة، وإن كانت فى

خط مستقيم أساسًا). وانطلقت بعد ذلك عبر الـ ١٥٠ مليون كيلومتر الأخيرة إلى الأرض فى ثمانى دقائق ونصف.

حتى وقت قريب ، كان الضوء النابع من طبقة سطح الشمس النيِّر (الفوتوسفير) هو الذى يمدنا بكل المعلومات التى لدينا عن داخل الشمس. وكانت هذه المعلومات، فى الواقع، توحى لنا بما يفعله قلب الشمس منذ عشرة ملايين عام مضت. لكن فى السبعينيات والثمانينيات من القرن العشرين تطورت تقنيتان جديدتان، التقنية الأولى تسبر القلب ذاته لاكتشاف ما يقوم به فى الوقت الراهن، والتقنية الثانية «تنظر» وتفحص داخل الشمس من خلال طبقاتها السطحية. ولقد أثبتت هذه التقنيات الجديدة أن علماء الفيزياء الفلكية كانوا قريبين جدًا فى حساباتهم من واقع الظروف القائمة داخل الشمس - لكن هذه التقنيات كشفت أيضًا أسرارًا جديدة عن سلوك الشمس والنجوم، وقدمت ألغازًا أخرى للعلماء تستحق التفكير.



شكل (٦ - ٢) : تركيب الشمس، من الداخل إلى الخارج.

الفصل الرابع

عدد قليل جداً من الأشباح

فى منتصف الستينيات من القرن العشرين، تهاوت الصورة المُرْضية للتقدم المُطَّرد الذى حققه علماء الفيزياء الفلكية فى طريقهم إلى فهم كامل لطريقة عمل النجوم. لقد بدا الأمر فى النهاية وكأن علماء الفلك، برغم كل شىء، لم يتمكنوا من فهم «شىء بسيط» مثل النجم، على حد قول إدينجتون ـ وكان الحرج مضاعفًا، لأن عمليات الرصد التى أثبتت وجود خلل فى فهمهم لم تكن لنجم بعيد باهت، ربما يصعب على العلماء فهمه، وإنما تتعلق تلك العمليات بالشمس نفسها، التى تُعتبر الأقرب إلينا والنجم الذى يتعين علينا أن نفهمه بشكل أفضل. إن المشكلة التى برزت فى عام ١٩٦٨ واستمرت عشرين عامًا، تتلخص فى أن الشمس تنتج عددًا قليلاً من الجسيمات الشبح التى تُسمى نيوترينات، وذلك إذا كانت النماذج القياسية لكيفية عمل النجوم صحيحة.

إن هذه الصعوبة فى فهم ما يجرى فى فنائنا الفلكى تُعتبر حاليًا جزءًا من صعوبة أكبر فى فهم تطور الكون بشكل عام. ويمكن حل المشكلتين، المحلية والكونية، كما سنرى، فى حزمة واحدة محكمة. لكن يجب أولاً أن نرجع للوراء ستين عامًا أو أكثر، إلى نهاية العشرينيات من القرن العشرين، عندما كان علماء الفيزياء الذرية يتصارعون من أجل فهم لغز ظاهرة انحلال بيتا التى تحدثتُ عنها باختصار فى الفصل الثالث.

الحاجة إلى نيوترينات

فى حالة انحلال بيتا، ينبعث إلكترون من النواة، ويُعرف أيضًا باسم شعاع بيتا. نحن نعلم الآن أن نيوترونًا داخل النواة الذرية يتحول فى العملية إلى بروتون - لكن فى العشرينيات من القرن العشرين لم يكن أحد يعرف شيئًا عن وجود النيوترونات، التى هى جسيمات تتساوى فى كتلتها تقريبًا مع البروتون (أى ألفَىْ ضعف كتلة الإلكترون) ولكنها لا تحمل أية شحنة كهربائية. وكان من بين مكونات لغز انحلال بيتا؛ كيفية انبعاث الإلكترونات من الأنوية الذرية فى جميع الاتجاهات وعند مستويات مختلفة من الطاقة، دون أن يتوازن ذلك مع ارتداد النواة نفسها. كان الأمر يبدو متناقضًا مع قانون بقاء كمية التحرك - إذا انطلق إلكترون من النواة فى اتجاه ما، يجب أن ينطلق شىء آخر فى الاتجاه المضاد، كما يحدث عند إطلاق بندقية، فإنها ترتد عند إنطلاق الرصاصة منها. ولم يتمكن أحد من العثور على «الجسيم الآخر» المفقود الذى من المفترَض أنه ينقل العزم بعيدًا عن النواة فى حالة انبعاث أشعة بيتا. ولبعض الوقت، فكر علماء الفيزياء بجدية فى احتمال أن تكون قوانين بقاء الطاقة وبقاء كمية التحرك معطلة بالنسبة للأنوية الذرية - بالضبط كما افترض من سبقوهم أن قانون بقاء الطاقة قد لا ينطبق على العمليات الإشعاعية. وجاء تفسير بديل فى عام ١٩٣٠ من عالم فيزياء ولد فى النمسا، ونال هذا التفسير تدريجيًا القبول باعتباره الحل الصحيح للغز.

ولد ڤولفجانج پولى (Wolfgang Pauli) فى ڤيينا عام ١٩٠٠، واشتهر بأنه أحد رواد المنظّرين فى زمانه. حصل على درجة الدكتوراه عام ١٩٢٢ فى جامعة ميونخ، وعمل مع كل من ماكس بورن ونيلز بوهر فى العصر الذهبى لفيزياء الكم. وبحلول عام ١٩٣٠، أصبح پولى أستاذًا للفيزياء فى المعهد الفيدرالى للتكنولوچيا بزيورخ، ثم أصبح بعد ذلك مواطنًا سويسريًا. وكان پولى معروفًا بتفكيره الثاقب - فلقد تمكن من أن يلفت الأنظار إليه وهو طالب فى التاسعة عشرة من عمره عندما قدم أوضح تقرير فى ذلك الوقت عن نظريتَىْ آينشتاين للنسبية - وتوصل إلى حل لمشكلة انحلال بيتا. ففى خطاب إلى ليز ميتنز(Lise Meitner)، وهو من علماء الفيزياء الذين أدت أبحاثهم إلى فهم عملية الانشطار النووى (العملية التى تمد القنبلة الذرية والمفاعلات النووية بالطاقة)، وقدم افتراضًا مباشرًا ودقيقًا بأن الطاقة "الإضافية" نُقلت بالفعل بواسطة جسيم آخر انبعث من النواة فى الوقت نفسه الذى انبعث فيه الإلكترون الذى تم رصده أثناء انحلال بيتا،

غير أن ذلك الجسيم المجهول لم يمكن رصده بالتكنولوچيا المتاحة فى ذلك الوقت، وقد لا يتم رصده أبدًا.

ونُشرت الفكرة رسميًا عام ١٩٣١، لكنها لم تحظ بتأييد مباشر بالرغم من سمعة پولى وشهرته . وتجدر الإشارة إلى أنه فى عام ١٩٣١ لم يكن معروفًا سوى اثنين فقط من الجسيمات الأساسية، هما: - الإلكترون والبروتون. وكان "اختراع" جسيم جديد يبدو خطوة كبيرة فى ذلك الوقت عنه فى العقود التالية - ويمكننا تخيل بعض علماء الفيزياء يرددون آنذاك بأنه إذا اخترع المنظرون جسيمًا جديدًا فى كل مرة لا يتمكن فيها التجريبيون من موازنة حساباتهم، فإلى أين سينتهى الأمر بعلم الفيزياء؟ بالإضافة إلى أن جسيم پولى الافتراضى كان يبدو شاذًا للغاية بحيث يصعب تصديقه. فهو جسيم شحنته صفر وليست له كتلة تقريبًا، وإلا لكان قد رُصد. وكما قال پولى، فإن الخاصية الوحيدة المسموح لهذا الجسيم بأن يمتلكها هى "اللف الذاتى"، وهى سمة خاصة بفيزياء الكم وتختلف عن مفهوم الدوران فى حياتنا اليومية (فالشىء الكمى مثلاً يجب أن يدور بالكامل "مرتين" لكى يعود مرة أخرى إلى حيث بدأ).

وأُطلق على الجسيم اسم "نيوترون". لكن الفكرة لم تحقق سوى تأثير ضعيف، حتى إن هذا الاسم سُرق عام ١٩٣٢ عند اكتشاف جسيم النيوترون الذى نعرفه حاليًا. غير أن پولى وجد حليفًا بعد ذلك بعام واحد، وهو عالم الفيزياء الإيطالى إنريكو فيرمى (En-rico Fermi) الذى اقترح اسم "نيوترينو" (وهو تصغير للنيوترون)، وجعل هذا الجسيم يكتسب احترامًا بتطويره نظرية جديدة لتفاعلات الجسيمات الذرية فيما بينها، حيث يلعب فيها النيوترينو دورًا كاملاً. (ولقد ساعد على ذلك بالطبع أن النيوترون نفسه كان قد تم اكتشافه. فإذا كان قد أصبح مقبولاً وجود جسيم متعادل كهربيًا، فإن علماء الفيزياء سيكونون أكثر استعدادًا للقبول بإمكانية وجود جسيم آخر أيضًا).

إن وصف فيرمى لظاهرة انحلال بيتا مطابق أساسًا للتفسير الحديث للظاهرة. عندما ينحل نيوترون فإنه ينبعث منه إلكترون ونيوترينو (وبتعبير أكثر تحديدًا جسيم النيوترينو المضاد)، ويتحول إلى بروتون. وتوازنت حسابات العلماء. فالفهم الجديد لعالم الجسيمات، الذى تم تطويره فى أعقاب تفسير فيرمى لنبوءة پولى ساعد فى نهاية الثلاثينيات وبعدها فى تطوير فهم تفاعلات الاندماج النووى الذى يحافظ على حرارة النجوم والشمس. وفى كل هذا العمل النظرى، لعب النيوترينو دورًا رئيسًا وأصبح لا غنى عنه. غير أن وجوده لم يثبت تجريبيًا بشكل نهائى إلا فى عام ١٩٥٦.

ولا يصعب تصور أسباب ذلك، لأن المفاجأة فى الحقيقة هى أن يتم رصد النيوترينات أصلاً. إن پولى نفسه قد اعتبر رصد هذا الجسيم أمرًا بعيد الاحتمال، حتى إنه قرر فى عام ١٩٣١ منح صندوق شمبانيا لأى عالم تجريبى ينجح فى هذا التحدى ، وكان مطمئنًا إلى أنه لن يخسر الرهان. وطبقًا للمفهوم الأصلى للنيوترينو، فإن شحنته صفر وكتلته صفر ويسير بسرعة الضوء (تفترض التحسينات اللاحقة أن كتلته صغيرة جدًا ويسير بسرعة قريبة جدًا من سرعة الضوء). إن النيوترينو لا يتفاعل مع الجسيمات الأخرى عبر القوة الكهرومغناطيسية التى تجعل الجزيئات تتماسك معًا، أو عبر القوة "القوية" التى تجعل مكونات الأنوية تتماسك مع بعضها البعض. وإذا استبعدنا قوة الجاذبية التى يكون تأثيرها ضئيلاً على جسيم له مثل هذه الكتلة الصغيرة، فإن النيوترينات تتفاعل فقط مع باقى العالم ضمن ما يُسمى بالقوة النووية "الضعيفة" التى اقترحها فيرمى لشرح سلوك الأنوية أثناء عملية الانحلال. وهو تفاعل ضعيف جدًا فى الحقيقة - إذا انتقل شعاع من النيوترينات، مثل تلك التى يُعتقد أنها تنتج من التفاعلات النووية داخل الشمس، خلال رصاص صلب لمسافة ٣٥٠٠ سنة ضوئية، فإن نصف هذه النيوترينات فقط ستمتصها أنوية ذرات الرصاص على امتداد الطريق.

إذا كانت النظرية القياسية لكيفية عمل النجوم صحيحة، فإن العمليات النووية الجارية فى قلب الشمس تنتج حوالى ٢×١٠^{٣٨} من النيوترينات فى كل ثانية. وإن حوالى عُشْر مقدار الطاقة التى نرصدها فى الضوء المرئى ينبعث فعليًا من الشمس فى شكل نيوترينات. لكن على خلاف الضوء المرئى، فإن النيوترينات تأتى مباشرة من قلب الشمس. وفى طريق الخروج عبر الشمس ذاتها، يتم امتصاص نيوترينو واحد فقط من كل ألف مليار نيوترينو، فى حين أن الأرض وأجسامنا شفافة على ما يبدو للنيوترينات. ففى الوقت الذى تقرأ فيه هذه الكلمات، تنطلق المليارات من هذه الجسيمات الشبح بسرعة خلالك فى كل ثانية، بدون أن يلاحظها جسدك أو أن تلاحظه هى.

إذًا، كيف يمكنك الإمساك بنيوترينو؟ إنك تحتاج إلى مكشاف (*) كبير (يحتوى على الكثير من الأنوية الذرية لكى تُتاح للنيوترينات فرصة للتفاعل)، كما تحتاج للكثير من النيوترينات (حيث قد يحدث أن توقف الأنوية التى يحتويها المكشاف عددًا من بين

(*) أداة للكشف عن الموجات الكهرومغناطيسية أو عن النشاط الإشعاعى. (المترجم).

مليارات النيوترينات التى تمر خلاله، حتى وإن كانت فرصة أى نيوترينو للتفاعل صغيرة). وتم إنجاز العمل لأول مرة عام ١٩٥٦ على يد فردريك رينز Frederick (Reines وكليد كوان (Clydie Cowan). لقد استخدما صهريجًا يحتوى على ألف رطل من الماء ووضعاه بجانب مفاعل سافانا ريفر النووى فى الولايات المتحدة. وطبقًا للنظرية، فإن النيوترينات المتدفقة من المفاعل النووى القريب والتى ستجتاز صهريج الماء، يجب أن يكون عددها أكبر ثلاثين مرة من عدد النيوترينات الشمسية التى تصل إلى المكشاف من الفضاء عبر ١٥٠ مليون كيلومتر، وبالتالى تكون هناك فرصة للإمساك بنيوترينو أو اثنين فى الصهريج كل ساعة. إن التفاعل الذى بحث عنه رينز وكوان، خلال مجموعة من الاختبارات أطلقا عليها اسم "مشروع الشبح الصاخب"، هو تفاعل نقيض انحلال بيتا.

ففى هذا التفاعل، يضرب النيوترينو المضاد بروتونًا ويحوله إلى نيوترون، بينما يحمل البوزيترون (الجسيم المضاد للإلكترون) الشحنة الموجبة بعيدًا. وكان البوزيترون هو الذى تم رصده حقيقة فى تجربة نهر سافاناه. وقد ظهرت فى عام ١٩٥٣ تلميحات عن "إشارة النيوترون" المتوقعة، أما التأكيد الكامل على صحة فكرة پولى فقد جاء فى عام ١٩٥٦. وعندئذ بعث رينز وكوان ببرقية إلى پولى يُعلّمانه بنجاحهما، ومنحهما پولى بدوره صندوق الشمپانيا الذى راهن به وهو فى الخامسة والعشرين من عمره.

لقد جعل الاكتشاف الناجح للنيوترينو الفيزياء النووية تقف على أقدام راسخة أكثر من أى وقت مضى، وأكسب المنظّرون ثقة متجددة. كما أوحى بتحدٍّ جديد ينتظر عالمًا تجريبيًا يتمتع بقدر كبير من الشجاعة. إذا كان من الممكن رصد النيوترينات - أو على الأقل رصد أحداث تُعزى مباشرة للنيوترينات - القادمة من مفاعل نووى هنا على الأرض، فقد يكون من الممكن التقاط قليل من النيوترينات الشمسية التى تمر بنا وخلالنا بالمليارات فى كل ثانية. إن فكرة "تلسكوب" لا يرصد سطح الشمس وإنما يوفر طرقًا لسبر الظروف داخلها مباشرة، ملكت خيال رجل كرَّس منذ ذلك الوقت حياته لاصطياد النيوترينات الشمسية.

لقد اعتبر العديد من المنظّرين جهود هذا الرجل مضيعة للوقت. كانوا يعرفون كيف تعمل النجوم - لقد أخبرهم النموذج القياسى للشمس بحرارتها الداخلية والضغوط الموجودة هناك، والتفاعلات النووية داخل الشمس. وكان من المتصور أن هذا المجهود

الضخم للإمساك ببعض النيوترينات لمجرد إثبات أن النظريات صحيحة، أمر غير مُجْدٍ. لكنهم كانوا على خطأ.

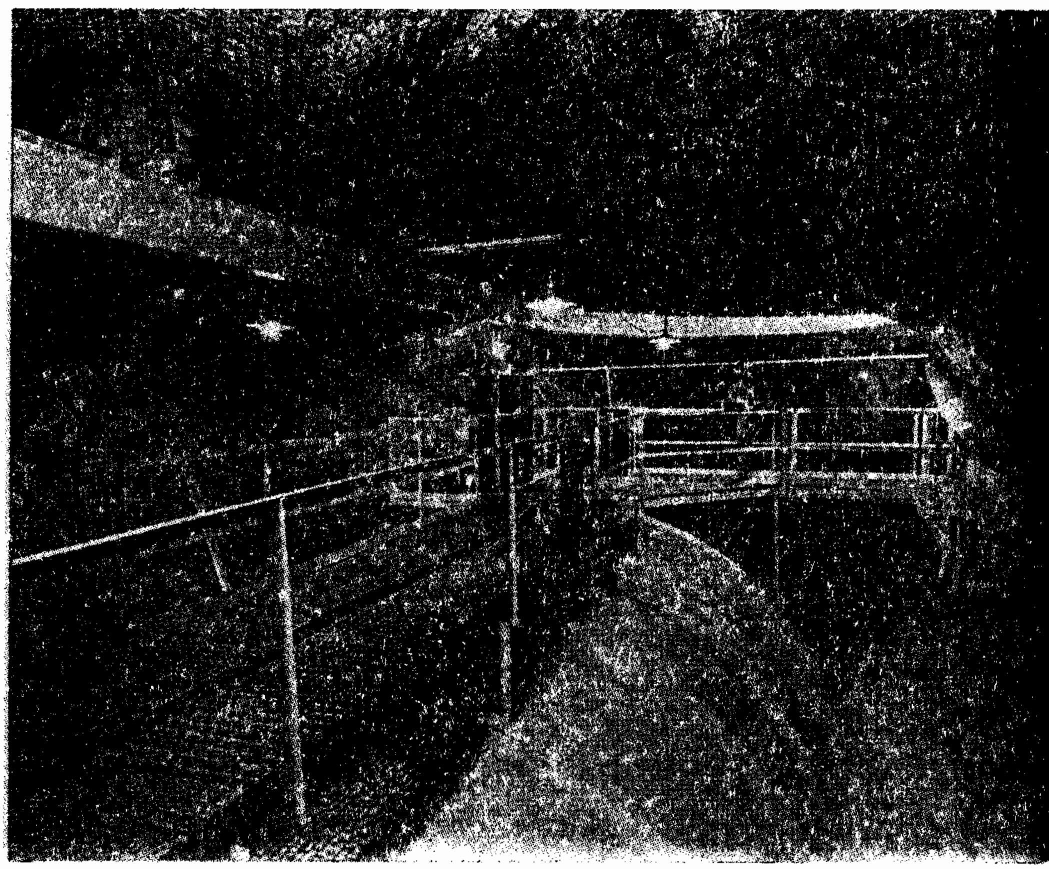
مكشاف داڤيز

لقد كان الرجل الذى قَبِلَ التحدى هو ريموند داڤيز الابن (Roymond Davis, jr,) الذى كان عضواً بمعمل بروكهڤن القومى، بلونج آيلند. ولم تكن نيويورك المكان الملائم لبناء مكشاف النيوترينو الشمسى. فهناك العديد من الأشياء الأخرى التى يمكن أن تتفاعل مع الأنوية الذرية وتجعلها تتحول، خاصة الأشعة الكونية - البروتونات والإلكترونات وجسيمات أخرى تضرب الأرض من الفضاء. وكان على داڤيز وزملائه أن يبنوا مكشافًا محميًا من أى شىء فيما عدا النيوترينات الشمسية. وكانت المفارقة أن النيوترينات هى فقط التى تمر عبر الأرض دون أن تتأثر، وبالتالى كان الحل الأمثل هو دفن التلسكوب الشمسى الجديد عميقًا فى باطن الأرض حيث لا يرى قط ضوء الشمس. وكان يتعين أن يكون المكشاف كبيرًا لزيادة احتمال التقاط ولو القليل من العدد الضخم من النيوترينات الشمسية التى تمر فى كل ثانية خلال كل سنتيمتر مكعب من حجمه.

وكانت البداية فى عام ١٩٦٤، حيث أُجريت التجربة على عمق ١٥٠٠ متر تحت سطح الأرض، فى منجم للذهب فى ليد جنوبى ولاية داكوتا؛ حيث أُزيل سبعة آلاف طن من الحجارة لإفساح مكان للمكشاف، وهو عبارة عن صهريج بحجم حمام سباحة أوليمبى (شكل ١-٤) يحتوى على ٤٠٠ ألف لتر من مادة فوق كلوريد الأثيلين ($C_2 CL_4$) الذى يُستخدم عادة كسائل تنظيف فى عمليات "التنظيف الجاف" وكان الكلور فى هذا السائل المنظف هو ما خطط داڤيز لاستخدامه لرصد النيوترينات الشمسية.

يعتمد اختيار هذا المكشاف على الفكرة التالية: إن حوالى ربع ذرات الكلور الموجودة طبيعيا على كوكب الأرض توجد فى شكل نظير الكلور أى كلور - ٣٧، حيث تحتوى نواة ذرة هذا النظير على ١٧ بروتونا و٢٠ نيوترونا. ومع وجود أربع ذرات كلور فى كل جزىء فوق كلوريد الأثيلين، فإن ذلك يعنى بشكل تقريبى وجود ذرة كلور - ٣٧ فى كل جزىء من سائل التنظيف الموجود فى الصهريج - أى حوالى ٢×١٠^٣٠ "هدف" محتمل للنيوترينات لكى ترتطم به. وفى الحالات النادرة للغاية التى يحدث فيها ان يتفاعل نيوترينو قادم من

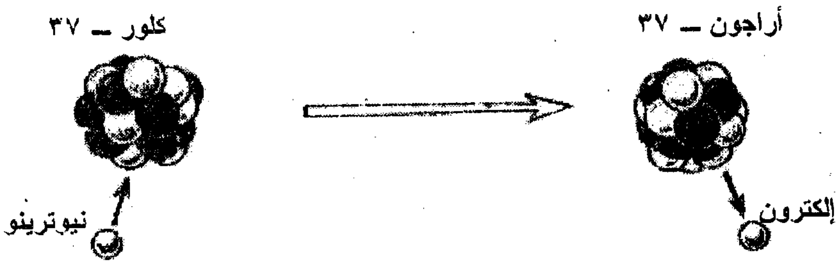
الشمس مع نواة ذرة كلور ـ ٣٧، فإن أحد النيوترونات فى هذه النواة تتحول إلى برتون وينبعث إلكترون ـ نوع من انبعاث قسرى الاشعة بيتا. وستحتوى النواة الناتجة على ١٨ بروتونا و١٩ نيوترونا، ومن ثم فهى "تنتمى" إلى عنصر الأراجون. وبشكل خاص إلى نظيره أراجون ـ ٣٧ (شكل ٢ ـ ٤). وتنطلق ذرة الأراجون، ومع اصطدام المزيد من النيوترينات مع أهدافها، تتراكم ذرات الأراجون فى صهريج سائل التنظيف كغاز مذاب.



شكل (١ ـ ٤) : مكشاف النيوترينو مدفونًا على عمق كبير تحت الأرض فى منجم للذهب. ويمتلئ صهريج "التلسكوب" بـ ٤٠٠ ألف لتر من سائل التنظيف.

وإذا تمكن فريق بروكهافن من إحصاء عدد ذرات لأراجون ـ ٣٧ فى الصهريج، فإنهم بذلك سيعرفون كم نيوترينًا تفاعل مع أنوية الكلور فى ذلك الصهريج.

لكن القيام بتلك المهمة ليس بالأمر السهل، لأن الأراجون ـ ٣٧ نفسه غير مستقر وينحل ليعطى كلور ـ ٣٧ مرة أخرى باقتناصه إلكترونًا، ولا يمكن الانتظار إلى ما لا



شكل (٢ ـ ٤) عندما يتفاعل نيوترينو منبعث من الشمس مع نواة كلور ـ ٣٧ فى الصهريج المدفون فى منجم للذهب، فإنه يحولها إلى نواة أراجون ـ ٣٧. ويُحصى مكشاف داڤيز فى الحقيقة عدد أنوية الأراجون الناتجة من هذه العملية.

نهاية لكى يتراكم الأراجوان فى الصهريج. ويُقدَّر العمر النصفى للأراجون ـ ٣٧ بحوالى ٣٤ يومًا، وبالتالى يتعين تنظيف الصهريج من الأراجون وعد ذراته كل بضعة أسابيع.

إن تجربة داڤيز، والتقنية المستخدمة لإحصاء ذرات الأراجون بشكل خاص، تُعد أجمل نماذج العمل فى كل الفيزياء. ولقد فاز علماء بجائزة نوبل من أجل أعمال أقل من ذلك بالطبع، وحتى الملخص الموجز الذى يتسع له المجال هنا يكفى لأن يبعث على الانبهار. أولاً يتعين "تطهير" صهريج سائل التنظيف الضخم من الأراجون ـ ٣٧، وذلك بإدخال غاز الهليوم فى شكل فقاقيع عبر الصهريج. فى الواقع، تتم إضافة بعض غاز الأراجون الخامل سواء أراجون ـ ٣٦ أو أراجون ـ ٣٨ إلى السائل، للمساعدة على تدفق أراجون ـ ٣٧، إلى الخارج. وتمتزج ذرات الأراجون (بما فى ذلك ذرات الأراجون ـ٣٧) مع الهليوم، وتخرج من الصهريج مع الغاز. ويتعين بعد ذلك فصل ذرات الأراجون عن الهليوم (وهو عمل تقنى بطولى لكنه يُعتبر بسيطًا بالمقارنة بباقى العمل). وقد استفاد فريق بروكهافن فى هذه المرحلة من حقيقة أن أراجون ـ ٣٧ ينحل ليعطى كلور ـ ٣٧ مرة أخرى. وعندما يحدث هذا الانحلال، تطلق الذرة المعنية كم طاقة مميَّزًا ومحددًا بدقة.

وقامت عدادات، محمية من الأشعة الكونية، بتسجيل كل ومضة نشاط للأراجون على امتداد فترة تصل إلى ٢٥٠ يومًا، وسجلت كل نبضة لها "توقيع" الطاقة الخاصة بذلك التحول. وبعد كل هذا المجهود، تم تسجيل ١٢ نبضة فى المتوسط فى كل دورة من التجربة. وهو عمل بارع ومذهل.

وظهرت النتائج الأولى للتجربة عام ١٩٦٨، وبدا أنها تتعارض مع تنبؤات النظرية القياسية للشمس. ولم يهتم أحد فى ذلك الوقت بهذا التعارض، لأنه كان يصعب تصديق أن التجربة الشاقة تم إجراؤها بالفعل بدرجة كافية من الدقة بحيث تكون دليلاً يُعتمد عليه لما يجرى داخل الشمس. وكان علماء الفيزياء الفلكية ينتظرون بثقة "تحسُّن" الأرقام التجريبية وأن تتفق مع تنبؤات نظرياتهم. وقد أُعيدت التجربة عدة مرات خلال العشرين عامًا الماضية، وتم اختبار كل خطوة مرارًا وتكرارًا (مثلاً، بإضافة كمية معلومة من الأراجون ـ ٣٧ للصهريج ومتابعة رد فعل المكشاف). وكانت الإجابة واحدة دائمًا. لقد تمكن داڤيز وزملاؤه من رصد ثلث عدد النيوترينات الشمسية التى يتعين رصدها حسب النظرية. ويتم، فى المتوسط، إنتاج ذرة أراجون ـ٣٧ واحدة فقط فى الصهريج كل يومين أو ثلاثة أيام. ويمكن إدراك التداعيات طويلة المدى لذلك بالنظر فقط إلى كيف وضع المنظّرون تنبؤاتهم الأكيدة القائلة بأنه يتعين على داڤيز أن يرصد ثلاثة أضعاف عدد النيوترينات الذى رصده فعلاً..

تنبؤات أخفقت

لقد وصفتُ فى الفصل الثالث كيف يتم إنتاج الطاقة داخل النجوم بشكل عام، وفى الشمس بشكل خاص. وطبقًا للنموذج القياسى، يتم إنتاج ما يقل عن ٢٪ من طاقة الشمس عن طريق دورة الكربون ـ النيتروچين ـ الأكسچين ، إن الشمس ببساطة ليست ساخنة بما يكفى لكى تسود هذه العملية. وبالرغم من ذلك ، فإن هذا التفاعل هو أول مصدر طاقة نووية نجمية تم اكتشافه، بالصدفة فى عام ١٩٣٨. إن علماء الفيزياء مقتنعون بأن أغلب طاقة الشمس تأتى من عملية اندماج تُعرف بسلسلة بروتون ـ بروتون (P-P.). من المفيد تلخيص كيف تعمل هذه السلسلة، مع التأكيد على الطرق التى تحرر النيوترينات على امتداد عملية الاندماج التدريجى لأنوية الهيدروچين (بروتونات) وتحولها إلى أنوية هليوم (جسيمات ألفا).

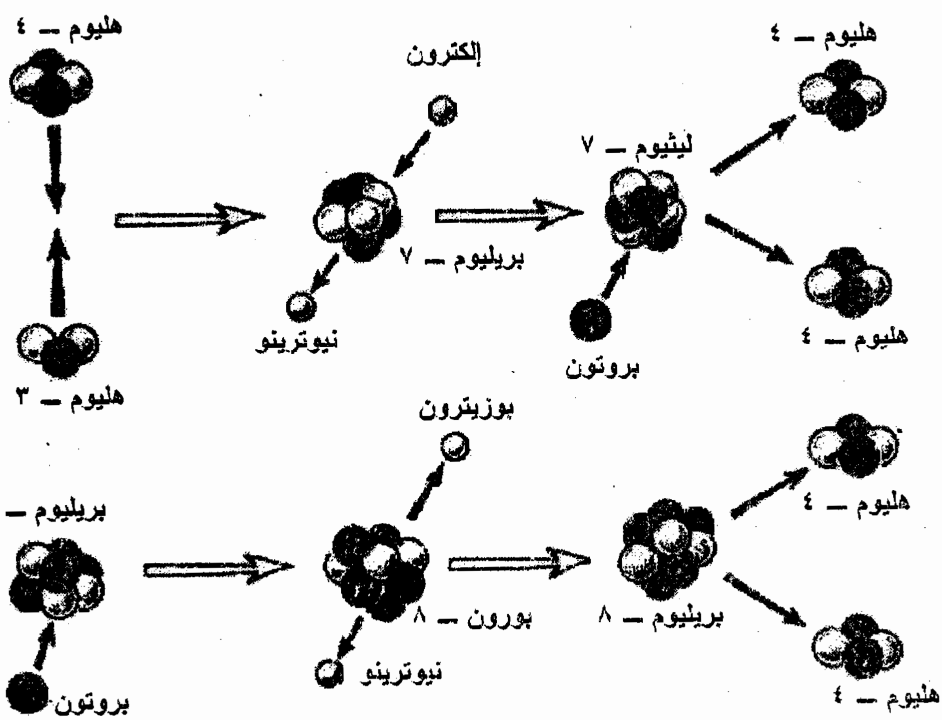
إن الشمس تتكون أساسًا من الهيدروچين، وفى قلب الشمس تنفصل أنوية ذرات الهيدروچين (البروتونات) عن إلكتروناتها وتسير بسرعات كبيرة، وتصطدم بشكل مستمر مع بروتونات أخرى وترتد عنها. ويحدث من وقت لآخر، فى مثل هذا الاصطدام أن يلتصق بروتونان معًا، ويتحرر بوزيترون من أحد البروتونين حيث يتحول إلى نيوترون. والنواة التى تتكون من بروتون ونيوترون هى ديوترون، أى نواة ذرة ديوتريوم، نظير الهيدروچين. وينطلق نيوترينو برفقة البوزيترون، ويمر على ما يبدو دون أن يعوقه شىء خارج الشمس إلى الفضاء. ولكى نتذكر أصل هذه النيوترينات يُشار إليها بأنها نيوترينات (بروتون - بروتون)، وهى لا تختلف عن النيوترينات الأخرى التى تنتج عن تحول البروتونات إلى نيوترونات لكنها ذات طاقة مميزة. وتحدث الخطوة التالية فى عملية الاندماج عندما يتحد بروتون مع ديوترون لتكوين نواة هليوم - ٣، ولا يتضمن هذا التفاعل أى نيوترينو.

ولا تستطيع أنوية الهليوم - ٣ أن تتحد مباشرة مع البروتونات، لكن عندما تصطدم أنوية ذرتَىْ هليوم - ٣ يمكن أن يحدث تفاعل أكثر تعقيدًا. إذ ينطلق "بروتونان" فى هذا التفاعل، ويتركان وراءهما نواة هليوم -٤ التى تحتوى على بروتونين ونيوترونين. بشكل عام، فإن أربعة برتونات تحولت إلى نواة هليوم - ٤، مع انطلاق جزء من الطاقة التى تحتفظ بالشمس ساخنة، بالإضافة إلى جُسيمَىْ بوزيترون يصاحب كل واحد منهما نيوترينو. هذه النيوترينات "لا" يستطيع داڤيز رصدها.

فى كل النشاط الذى يحدث فى قلب الشمس، قد تصطدم أحيانًا نواة هليوم -٣ ونواة هليوم - ٤ وتكوّنان نواة بريليوم - ٧. وفى ظل الظروف القائمة داخل الشمس يستطيع البريليوم - ٧ أن يتصرف بطريقتين. الطريقة الأولى أن تلتقط نواة البريليوم -٧ إلكترونًا وتطرد نيوترينًا، لتصبح نظير ليثيوم (ليثيوم - ٧)، حيث تحول أحد بروتوناتها إلى نيوترون فى تفاعل عكسى للانحلال بيتا. ويستطيع الليثيوم - ٧ عندئذ أن يلتقط بروتونًا آخر وينشق إلى نواتين من أنوية هليوم - ٤ (تفاعل كوك كروفت - والتون). والاختيار البديل، أن تلتقط نواة البريليوم - ٧ بروتونًا أولاً لتصبح نواة بورون -٨، التى تنحل فى أقل من ثانية طاردةً بوزيترونًا ونيوترينًا لتصبح نواة بريليوم - ٨ وتنشق عندئذ إلى نواتَىْ هليوم - ٤. إن النيوترينات الناتجة من هذه التفاعلات (أساسًا نيوترينات البورون - ٨) هى التى يستطيع داڤيز رصدها. ويتم إنتاج هذه النيوترينات بشكل نادر مقارنة مع نيوترينات البروتون - بروتون، لكنها تحمل طاقة أكبر بكثير.

إن نيوترينات البروتون ـ بروتون ليس لديها الطاقة الكافية لإحداث تحول الكلور ـ٣٧ إلى أراجون ـ ٣٧. أما نيوترينات البريليوم ـ ٧ ، فلديها طاقة تكفى لقيام بعضها بذلك، فى حين أن لدى نيوترينات البورون ـ ٨ وفرة من الطاقة تسمح بحدوث هذا التحول.

إذًا، كم عدد النيوترينات التى يتم إنتاجها بواسطة كل عملية داخل الشمس، وكم عدد النيوترينات التى يستطيع دافيز رصدها طبقًا للنموذج القياسى؟ عند هذه المرحلة، تتحد النظرية والتجربة حيث يخبر علماء الفيزياء الفلكية علماء فيزياء الجسيمات بالظروف فى مركز الشمس طبقًا للنموذج القياسى. أما العلماء التجريبيون فى معمل كيلوج للطاقة الإشعاعية، فيقومون بإحداث تسارع لأشعة من البروتونات والديوترونات



شكل (٣ ـ ٤): إن النيوترينات التى يرصدها دافيز تأتى فى الحقيقة من تفاعل جانبى لسلسلة بروتون ـ بروتون(P-P). إذ تندمج أحيانًا فى قلب الشمس نواة هليوم ـ ٤ مع نواة هليوم ـ ٣، وليس مع نواة هليوم ـ ٤ أخرى، وينتج عن ذلك بريليوم ـ ٧، الذى يستطيع أن يتبع طريقين مختلفين، موضحين هنا، ليكون فى النهاية نواتىْ هليوم ـ ٤. إن النيوترينات الناتجة من هذه التفاعلات، وأساسًا نيوترينات البورون ـ ٨ من السلسلة السفلية، هى التى يستطيع دافيز رصدها.

وأنوية هليوم ـ ٣ وأنوية هليوم ـ ٤ فى مسارعات الجسيمات، ويراقبون تفاعلها ويقيسون العدد الناتج من الأنواع المختلفة من الأنوية. كما يمكنهم أن يعيدوا التفاعلات التى تجرى فى قلب الشمس ـ كل على حدة ـ ويقيسوا كفاءة تلك التفاعلات مقارنة بكميات معلومة كعينات إحصائية.

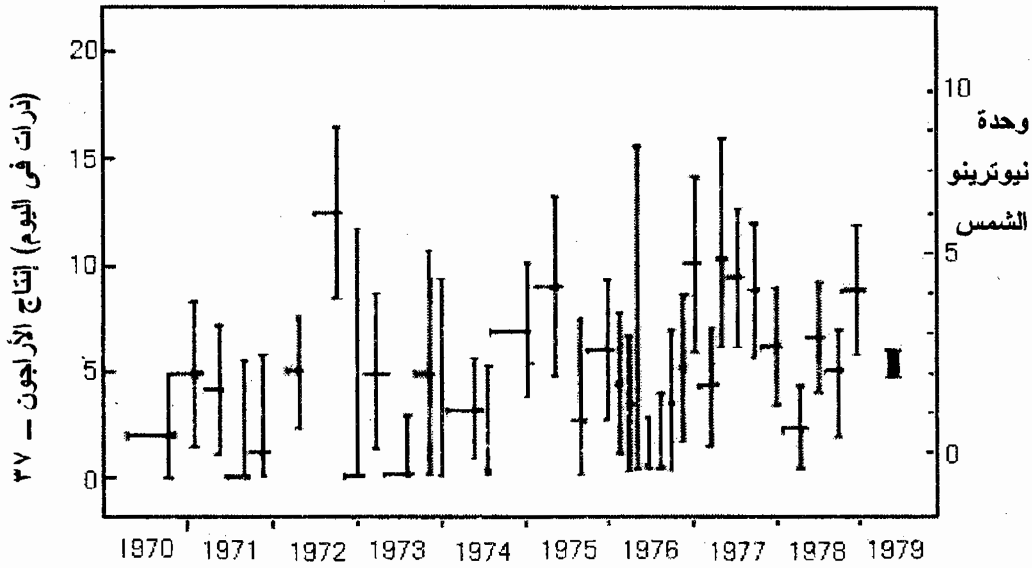
إن الظروف التى يتم فيها تصادم الأشعة تختلف تمامًا، بالطبع، عن تلك الموجودة داخل الشمس. ويحب ويلى فوولر (Willy Fowler) من معمل كيلوج أن يستعير ملحوظة إدينجتون الشهيرة قائلاً: «إن ما يمكن حدوثه فى الشمس يكون صعبًا للغاية فى معمل كيلوج للطاقة الإشعاعية». لكن بمجرد قياس العينات الإحصائية على امتداد نطاق معين من مستويات الطاقة، يمكن استكمال الأرقام استقرائيًا واستنتاج معدلات التفاعل المناسبة فى ظل ظروف الضغط ودرجة الحرارة التى يقول المنظرون، إنها موجودة داخل الشمس.

عندما فعل فوولر وزملاؤه ذلك، وجدوا أن تفاعل البروتون ـ بروتون(P-P.) الرئيس يجب أن ينتج فيضًا من ستين مليار نيوترينو يخترق كل سم٢ من كوكب الأرض فى كل ثانية. لكن للأسف، ليس لهذه النيوترينات الطاقة الكافية لكى يتم رصدها بواسطة تجربة دافيز. وبالنسبة للتنبؤات الخاصة بنيوترينات البريليوم ـ ٧ والبورون ـ ٨، فهى حساسة جدًا لدرجة الحرارة الصحيحة التى تغذى بها الحسابات. فالحرارة المركزية للشمس طبقًا للنموذج القياسى تُقدر بـ ١٥ مليون كلفن. ويتعين عند درجة الحرارة تلك، أن تجتاز أربعة مليارات نيوترينو البريليوم ـ٧ كل سم٢ من كوكب الأرض فى الثانية الواحدة، كما يتعين أن تحدث هذه النيوترينات خمسة تفاعلات "شهريًا"فى صهريج منجم الذهب. وتقضى أرقام النموذج القياسى أن يصل إلى الصهريج فيض من نيوترينات البورون ـ ٨ يُقدر بثلاثة ملايين نيوترينو فى الثانية لكل سم٢، لكن هذه النيوترينات ذات طاقة عالية بحيث يجب أن تُحدث عشرين تفاعلاً فى الشهر. بشكل عام، يجب أن تنتج تجربة دافيز ٢٥ تفاعلاً فى الشهر. لكن، على امتداد عشرين عامًا لم تُسجل سوى تسعة تفاعلات فى المتوسط شهريًا يمكن أن تُعزى للنيوترينات الشمسية.

هناك طريقة أخرى للتعبير عن هذه النتيجة، لكنها تفضى إلى الشىء نفسه. لقد شارك عالم الفيزياء النظرية چون باكول (John Bahcall) بشكل حميم فى البحث عن

النيوترينات الشمسية، وراقب بدقة شديدة كل مصادر الخطأ الممكنة فى الحسابات. وكان باكول قد ولد فى ٣٠ من ديسمبر عام ١٩٣٤ بولاية لويزيانا، وتخرج فى جامعة بيركلى عام ١٩٥٦، وحصل على درجة الدكتوراه من جامعة هارفارد عام ١٩٦١. وبالرغم من أن تدريبه المبكر كان فى مجال الفيزياء النظرية، فإنه خلال الستينيات من القرن العشرين عمل لعدة سنوات فى Caltech، حيث "تحول" إلى الفيزياء الفلكية. وقد أجرى منذ عام ١٩٦٣ حسابات نظرية متطورة ومعقدة ومتزايدة الدقة لمعدل النيوترينات المتوقع رصده على كوكب الأرض، وقد أتاح بحث قدمه عام ١٩٦٤ الأساس النظرى لثقة دافيز بإمكانية بناء مكشاف يستطيع بالفعل "رؤية" النيوترينات الشمسية.

وابتكر باكول وحدة قياس سُميت " وحدة النيوترينو الشمسى" أو SNU، لقياس تفاعلات مثل تلك التى رصدها دافيز . ويتنبأ النموذج القياسى بأن مكشاف دافيز يجب أن يسجل ما بين ست أو ثمانى وحدات نيوترينو شمسى تقريبًا، أخذًا بعين الاعتبار عدم التيقن فى الحسابات. وتتطابق التفاعلات المرصودة مع وحدتين أو ثلاث وحدات من وحدة النيوترينو الشمسى تلك. أى أن المكشاف يرى بشكل تقريبى ثلث عدد النيوترينات المتوقعة فقط. لماذا؟



شكل (٤ ـ ٤) : قيمة قياسات النيوترينو الشمسى على امتداد عقد كامل، مُعَبرًا عنها بعدد ذرات الأراجون ـ٣٧ المنتجة وكذلك بوحدات النيوترينو الشمسى (SNU)، ويتنبأ النموذج الشمسى بـ "فيض" يتراوح بين ست وثمانى وحدات نيوترينو شمسى، غير أن القياسات أظهرت ثلث هذا الرقم فقط. هذه هى "مشكلة النيوترينو الشمسى".

معالجات يائسة

أما إننا لا نفهم كيف تتكون النيوترينات فى التفاعلات النووية أو لا نفهم كيف تعمل النجوم ـ على الأقل لا نفهم بالقدر الذى نتصوره. لقد تحطمت تمامًا أية آمال تبقت بين المنظرين باحتمال وجود خطأ فى تجربة داڤيز قد تُخْرجهم من المأزق، وذلك عندما أكدت نتائج أظهرها مكشاف يابانى فى عام ١٩٨٨ نقص النيوترينات الشمسية (هذا المكشاف تم تصميمه فى الواقع لغرض آخر، لكنه قادر على رصد نيوترينات البورون ـ ٨ القادمة من الشمس).

ورغم أن أحدًا لم يشك حقيقة فى نتائج داڤيز، إلا أن هذا التأكيد طمأن فريقه، غير أنه ترك المنظرين فى حالة ارتباك شديد، فيما يتعلق بتحديد ما إذا كان يتعين عليهم مراجعة نظرياتهم فى مجال الفيزياء الفلكية أم فى مجال فيزياء الجسيمات. وأثار هذان البديلان لتفسير نتائج تجربة داڤيز رعب المنظرين، مما دفعهم إلى بحث يائس عن معالجات لمشكلة النيوترينو الشمسى. لكن قبل أن نعرض لبعض هذه الأفكار الشاذة، من المفيد أن نأخذ قدرًا من الراحة، على الأقل فيما يتعلق بالجزء الإيجابى من الأنباء التى برزت من تجربة منجم الذهب. لقد أشرنا إلى أن النموذج القياسى للشمس يفترض أن أقل من ٢٪ من طاقة الشمس تتولد نتيجة دورة الكربون ـ النيتروچين ـ الأكسچين. وإذا كانت كل طاقة الشمس تتولد بواسطة هذه الدورة، فإن معدل التقاط النيوترينو المتوقع فى مكشاف داڤيز لن يقل عن ٢٥ وحدة نيوترينو شمسى (SNU). وهو ما لم يتم رصده إطلاقًا، مما يؤكد أن المنظرين كانوا على حق فيما يتعلق، على الأقل، بالجزء الأكبر من عملية توليد الطاقة.

إلى أى مدى يمكن الثقة فى حساباتهم الأخرى؟ لقد تم فى بداية ومنتصف الستينيات من القرن العشرين تنقيح تقديرات معدل إنتاج النيوترينو فى الشمس، حيث فكر المنظرون فى ضرورة أن تتضمن حساباتهم عوامل إضافية. ولقد حفزهم على ذلك علمهم بأن داڤيز وفريقه يعملون فى مكشاف للنيوترينو، فبذلوا جهدًا مكثفًا لتكون توقعاتهم دقيقة قدر المستطاع، وذلك بإدخال كل عامل وثيق الصلة بالموضوع واستخدام أفضل نماذج الكمبيوتر لكيفية عمل الشمس. ولأنه لم يسبق لأحد أن قام بمثل هذا الجهد المكثف، فلقد استغرق العمل بضع سنوات لتطوير أفضل النماذج الممكنة. غير أنه بحلول ١٩٦٩، نفدت أية تأثيرات "جديده" يمكن تضمينها، مما لا يترك سوى إمكانية

تعديل متواضع للنموذج القياسى. وظل علم الفيزياء عند هذه النقطة منذ ذلك الوقت، وبالرغم من التحسن الكبير لإمكانات الكمبيوتر، فإن التنبؤات ظلت حول ست وحدات نيوترينو شمسى (SNU) .إن الطريقة الوحيدة لتخفيض الأرقام بالقدر المطلوب، هى إحداث تغيير عنيف فى النموذج القياسى للشمس.

إن كلمة "عنيف"، فى هذه الحالة، كلمة نسبية. لأن تجربة دافيز ترصد فقط نوع النيوترينات الشمسية التى يتسم معدل إنتاجها ذاته بحساسية عالية لدرجة الحرارة فى قلب الشمس. ومن ثَم، فإن أبسط طريقة للتوفيق بين النظريات والمشاهدات هى تخفيض درجة الحرارة فى قلب الشمس بمقدار ١٠٪ عن النماذج القياسية ـ أقل قليلاً من ١٤ مليون كلفن بدلاً من حوالى ١٥ مليون كلفن. ولا شك أن إدينجتون لم يكن ليعتبر ذلك خطوة عنيفة، خاصة عندما تتذكر أن أول محاولة قام بها لحساب درجة الحرارة فى قلب الشمس أعطت رقم ٤٠ مليون كلفن، وبعد مراجعة هذا الرقم تم تخفيضه إلى ١٥ مليون كلفن، وبالتالى فإن خفض مليون درجة أخرى يجب ألا يبعث على القلق. لكن مقدار التعقيد والدقة الظاهرية للنماذج الحديثة لكيفية عمل النجوم، أدى إلى أن أى تعديل فى درجة حرارة مركز الشمس ولو بمعدل ١٠٪ فقط "لا يمكن" دمجه فى النموذج القياسى.

وعندما أصبح ذلك مفهوماً بشكل جيد، حاول علماء الفيزياء الفلكية، بكل الطرق الممكن تخيلها، إحداث التغيير الضرورى فى تركيب الشمس، حيث طرحوا تباعًا كل جزء من النموذج القياسى (وفى بعض الأحيان كل النموذج دفعة واحدة!). إن القليل فقط من هذه الأفكار يمثل محاولات جادة لمعرفة لماذا لا يفى النموذج القياسى للشمس بالغرض، ولتدبُّر كيف سيؤثر ذلك على فهمنا للنجوم بشكل عام. كانت أغلب هذه الأفكار، كما وصفها چون باكول، "حلول حفل كوكتيل"، أى أنها أفكار حلم بها البعض (ربما بعد عدة كؤوس) على أساس أخذ مشكلة النيوترينو الشمسى وحدها فى الاعتبار، دون محاولة تقديم أية رؤية جادة فيما يتعلق بتركيب النجوم بشكل عام.

لقد تضمنت أكثر الاقتراحات جدية فكرة أن الأجزاء الداخلية عند مركز الشمس تدور بسرعة أكبر من سرعة دوران طبقاتها السطحية. وأن هذا الدوران السريع قد يساعد على تماسك الشمس فى مواجهة شد قوة الجاذبية الخاصة بها والمتجه نحو الداخل، ويقلل الضغط ودرجة الحرارة فى مركزها. وتفترض حجة مماثلة أن هناك

مجالاً مغناطيسيًا قويًا داخل الشمس، يقاوم الانضغاط الناجم عن قوة الجاذبية. لكن أيًا من هذه التأثيرات كان سيشوه شكل الشمس ويجعلها منبعجة عند القطبين (أكبر عبر خط الاعتدال عنها من القطب إلى القطب المقابل)، بدلاً من أن تبدو كروية، ولم يتم رصد مثل هذه التشوهات.

ولقد نشرت بعض المجلات العلمية الجادة أفكارًا أشد غرابة وشذوذًا، مثل: إمكانية وجود ثقب أسود صغير فى قلب الشمس ينتج أكثر من نصف طاقتها، وافتراض آخر بأن الشمس تشكلت على مرحلتين، وأن لها قلبًا غنيًا بالحديد يحيط به "غلاف جوى" من الهيدروچين الذى تجمَّع من الفضاء فى تاريخ لاحق. وذلك فضلاً عن فكرة أخرى (نقيض هذا الاقتراح) تقول إنه لا توجد داخل الشمس أية عناصر ثقيلة على الإطلاق، بحيث تستطيع الأشعة أن تهرب من القلب بسهولة أكبر منها فى حالة النموذج القياسى.

ومن أكثر المعالجات اليائسة لمشكلة النيوترينو الشمسى إثارة للحيرة والفضول، الافتراض القائل بأن الشمس قد لا تكون فى حالة"طبيعية "فى الوقت الراهن. إن النماذج القياسية للمنظرين تقول لنا فقط، برغم كل شىء، عن متوسط الظروف داخل الشمس على المدى الطويل.

وكما أدرك كلفن وهلمهولتز، فإن الشمس قد لا تكون فى حالة مستقرة الآن. وبدفع هذه الفكرة إلى الأمام، بشروط حديثة، فإن الشمس بإمكانها أن تحافظ على سطوعها الحالى لملايين السنين بأن تنكمش قليلاً وتحول طاقة الجاذبية إلى حرارة، وذلك بافتراض توقف كافة التفاعلات النووية الدائرة داخل الشمس. قد لا تصلح فكرة كلفن - هلمهولتز كتفسير لكيفية احتفاظ الشمس بحرارتها فى حين تطورت الحياة على كوكب الأرض، إلا أنها تقدم، احتماليًا، آلية نافعة متاحة للتخفيف من أى عجز مؤقت فى ذخيرة الطاقة النووية. إن كل الأفكار التى قُدمت "لتفسير" كيف يمكن للشمس أن تتوقف مؤقتًا عن الغليان كانت، للأسف، من نوع حلول حفل الكوكتيل.

ربما أن الهليوم الناتج عن اندماج البروتونات، قد تراكم كنوع من الرماد الكونى فى مركز الشمس، مما أدى إلى أن يتوقف الاندماج لبعض الوقت، وعندئذ يحدث فُواق داخلى كبير وتنقلب كل المنطقة المركزية للشمس بواسطة الحمل الحرارى، مما يؤدى إلى مزج المزيد من البروتونات من الخارج لكى تبدأ الأمور تسير من جديد. أو ربما أن النظام الشمسى مر مؤخرًا خلال سحابة من الغاز والتراب فى الفضاء، مع تجمُّع مادة

على "سطح" الشمس؛ مما عطل مؤقتًا تدفق الحرارة إلى الخارج وسبب تعديلات داخلية قللت من النشاط النووى. ربما ـ لكن كل مثل هذه الحلول تبدو مُختَرعة وتحتال على المشكلة. كما أنها تثير سؤالاً جديدًا: إذا كانت الشمس تنتج بالفعل "عادة" فيض النيوترينات الذى تنبأ به النموذج القياسى، وإنها خفضت إنتاجها مؤقتًا، أليس أمرًا غريبًا أن نكون هنا لنشهد هذا الحادث النادر جدًا فى تاريخ الشمس؟

يمكننى الاستمرار، لكن عرض المزيد من المعالجات اليائسة يصبح عقيمًا. عندما تفترض إحدى النظريات أن ثابت الجاذبية نفسه يتعين أن يتغير مع عمر الكون، وبالتالى فإن كل الحسابات القياسية لكيفية تطور الشمس خاطئة، فإن الوقت قد آذن بالتوقف. ولا ينطبق ذلك على كل التخمينات ـ فعندما تخفق الأفكار القياسية، يصبح التخمين جزءًا مكملاً للعلم. لكن التخمين البنَّاء يجب أن تتم مقارنته بالمشاهدة والتجربة لتخليصه من شطحات الخيال الشاذة، وقد فشلت كل التغيرات المقترحة للنموذج الشمسى القياسى فى هذا الاختبار. ولقد ذكر باكول فى مقال نقدى نُشر فى عام ١٩٨٥ أنه وداڤيز تعقبا، خلال الفترة ما بين عامَىْ ١٩٦٩و١٩٧٧، كل "التفسيرات" الجديدة للغز النيوترينو الشمسى عند نشرها، وأحصيا تسع عشرة فكرة لما يمكن أن يكون خطأ فى النموذج القياسى، أى أن "معدل الأفكار المقترحة تراوح بين ٢ إلى ٣ أفكار سنويًا". وعندما يكون التخمين غير مقيد لهذه الدرجة، تصبح الحاجة ملحة لتناول مختلف للمشكلة. وقد تَحقق ذلك فى السنوات القليلة الماضية، على يد علماء فيزياء الجسيمات الذين قدموا عدة اقتراحات، وهى وإن كانت فى إطار التخمين، إلا أنها تميزت على الأقل بإمكانية اختبارها فى المستقبل القريب.

حلول تخمينية

"إذا" كنا نفهم كيف تعمل النجوم، و"إذا" كان لدينا الأعداد الصحيحة من أجل العيّنات الإحصائية المشاركة فى تفاعلات البورون ـ ٨ ، عندئذ يبقى احتمال واحد. افترض بعض علماء الفيزياء، فى السبعينيات من القرن العشرين أننا ربما لا نفهم "النيوترينات" بالدرجة التى نعتقدها. هل من الممكن أن يحدث شىء ما للنيوترينات وهى فى طريقها من الشمس إلينا، بحيث حتى وإن كان العدد "الصحيح" من النيوترينات ينطلق من الشمس فى البداية، فإن ثلث هذا العدد فقط يتبقى لكى يرصده داڤيز عند بلوغه كوكب الأرض؟

إن الفكرة ليست مجنونة تمامًا، لأن العديد من الجسيمات المعروفة حاليًا تنحل بهذه الطريقة وتتحول إلى شىء آخر بعد فترة مناسبة من الوقت طالت أو قصرت. حتى النيوترون ينحل فى غضون دقائق قليلة (إذا لم يكن جزءًا من نواة ذرية)، إلى بروتون وإلكترون. لكن هناك مشكلة بسيطة فى العثور على شىء آخر يمكن أن تتحول إليه النيوترينات. وطبقًا لأفضل فهم حديث لعالم الجسيمات، فإن البروتونات والنيوترونات ليست فى الحقيقة جسيمات "أساسية"، لكنها تتكون من نوع آخر من الجسيمات، الكوارك (Quarks)، التى هى ذاتها المُكوّن الأساسى لبناء المادة. من ناحية أخرى، فإن الإلكترونات جسيمات أساسية حقيقية، ولا تنحل قط، وتنتمى النيوترينات إلى نفس أسرة الإلكترونات والتى تُسمى لبتون(*) ولا يوجد شىء أكثر بساطة يمكن أن ينحل إليه النيوترينو، لكن ربما يمكن أن يتحول إلى نوع آخر من النيوترينو.

لقد طُرحت هذه الفكرة، التى سُميت تذبذب النيوترينو، فى بداية الستينيات من القرن العشرين على يد فريق بحث سوفيتى وآخر يابانى يعمل كل منهما بشكل مستقل عن الآخر. ويرجع الدافع وراء تخمينهم إلى اكتشاف جسيم سُمى الميون (Muon) فى عام ١٩٣٦ .إن الميون يماثل الإلكترون لكن كتلته تساوى مائتى ضعف كتلة الإلكترون، وهو عضو فى أسرة اللپتون، لكن مكانه فى عالم الجسيمات ظل لغزًا حتى عقد السبعينيات. إن الميون إذا تُرك وحده سينحل إلى إلكترون ونيوترينو ونيوترينو مضاد خلال ٢,٢ ميكروثانية. وبالطبع كان من غير الممكن رصد النيوترينات فى عقد الثلاثينيات، ولم يحدث تقدم يُذكر فى فهم الميون حتى عام ١٩٥٩، عندما اقترح برونو پونتيكورڤو، الذى وُلد فى إيطاليا وكان يعمل وقتذاك فى دوبنا بالاتحاد السوڤيتى، وكذلك ملڤن شوارز، بجامعة كولومبيا فى الولايات المتحدة ـ تقنية لخلق أشعة من الميونات وشركائها من النيوترينات، وهى التقنية التى قام بتنفيذها بعد ذلك مركز أبحاث CERN وبروكهاڤن. وبحلول عام ١٩٦٢، أثبت شوارز وزملاؤه أن النيوترينات المرتبطة بالميونات مختلفة عن النيوترينات المرتبطة بالإلكترونات. فعندما يضرب نيوترينو إلكترونى نيوترونًا فإنه سيعطى دائمًا بروتونًا زائد إلكترون، أما عندما يضرب نيوترينو ميونى نيوترونًا فإنه سيعطى دائمًا بروتونًا زائد ميون.

وهذا الاكتشاف هو الذى قاد إلى افتراض أن النيوترينو الإنكترونى قد يكون قادرًا على تغيير علاماته. وطبقًا لهذا الافتراض، ربما يكون شعاع من النيوترينات، الذى كان

(*) جسيم نووى ضئيل الكتلة مثل الإلكترون والپوزيترون (Lepton).

يحتوى فى الأصل نيوترينات إلكترونية فقط، قد تحول بشكل ما إلى خليط من النيوترينات الميونية والنيوترينات الإلكترونية. إن تداعيات ذلك بالنسبة لتجربة دافيز التى تستطيع أن ترصد فقط النيوترينات "الإلكترونية" واضحة. وفى عام ١٩٧٥، أصبحت ملفتة للنظر حقيقة أن دافيز رصد ثلث العدد المتوقع من النيوترينات الإلكترونية، وذلك مع اكتشاف عضو آخر فى أسرة اللپتونات، هو جسيم تو(Tau)، وهو جسيم مثل الإلكترون والميون فيما عدا أن كتلته ضعف كتلة البروتون. وتم بشكل عام افتراض وجود نوع ثالث من النيوترينات مرتبط مع جسيم تو، وإن كان لم يتم التأكد من ذلك بالتجربة.

ومعنى ذلك، أنه إذا أصبح شعاع من النيوترينات الإلكترونية، بطريقة ما، خليطًا من النوعيات الثلاث الممكنة وبأعداد متساوية، فإن ما سيتم رصده هو ثلث العدد الأصلى للنيوترينات الإلكترونية بالضبط. وقد يفشل هذا التطابق بالطبع إذا تم اكتشاف المزيد من أفراد عائلة لپتون. ولكن هناك ثلاثة أنواع رئيسة فقط من أزواج الكوارك، يرتبط كل زوج منها بواحد من أزواج اللپتون الثلاثة، ولدى علماء الفيزياء أسباب مضمونة يمكن الاعتماد عليها للاعتقاد بأن تلك هى كل أنواع الجسيمات الأساسية التى يتسع لها الكون. لكن يظل هناك سؤال هو: "كيف" يمكن لشعاع من النيوترينات الإلكترونية أن يغير علاماته - وهى عملية شبهها راينز بكلب يسير عبر الطرقات ويحول نفسه إلى قط أثناء سيره؟.

إن هذا النوع من التحول، فى ظل الظروف المناسبة معروف، فى الحقيقة، فى عالم الجسيمات. إن العامل الحاسم هنا هو أن "الظروف المناسبة" تتضمن أن يكون للجسيمات المعنية كتلة صغيرة - لا يجب أن تكون كتلتها كبيرة ولكن يجب أن تكون أكبر من الصفر. قد "افترض" الجميع دائمًا أن كتلة النيوترينو صفر بالضبط، ولكن لم يسبق أن قاسها أحد قط - لنفكر قليلاً فى صعوبة رصد النيوترينو، لنترك جانبًا وزنه، وستعلم سبب ذلك. هناك طرق لتقدير كتل النيوترينات، وذلك بقياس كمية الطاقة التى تنقلها أثناء بعض التفاعلات. وقد ادعى باحثون سوفيت بقوة وثبات، فى السنوات الأخيرة، ان تجاربهم أثبتت أن النيوترينات لها كتلة، وأن كل نيوترينو يساوى حوالى ثلاثين إلكترون ڤولت، أى ٠,٠٠٦٪ من كتلة الإلكترون. ولم يوافق باحثون آخرون على ذلك - حيث وضعت تجاربهم حدودًا فقط لأقصى كتلة ممكنة للنيوترينو، وهذه الحدود

لا تتجاوز عشرين إلكترون ڤولت. ولا يعنى ذلك أن النيوترينو "له" هذه الكتلة، وإنما يعنى، طبقًا لتلك التجارب، أنْ ليست هناك وسيلة لتكون له كتلة "أكبر"، بل يمكن أن تكون كتلته أقل بكثير ـ ويمكن حتى أن تساوى صفرًا. من الواضح أن الموقف يتطلب تجارب أكثر وأفضل، وأن هناك خلافًا ليس من السهل حله فى المستقبل المباشر بحيث يرضى الجميع. لكن على الأقل يظل من الوارد أن يكون للنيوترينات كتلة صغيرة، ومن ثَم يمكنها أيضًا أن تغير علاماتها أثناء ثمانى الدقائق والنصف التى تستغرقها رحلتها من الشمس إلى كوكب الأرض. فى هذا الإطار، يمكن أن يغير كل نيوترينو من "نكهته" أو صفته المميزة، ملايين المرات كل ثانية بشكل متكرر، وفى هذه الحالة تكون تجربة داڤيز قد التقطت فقط النيوترينات التى حدث أن أصبحت "نيوترينو إلكترونى" لحظة اصطدامها بصهريجه الذى يحتوى على سائل التنظيف.

رغم أن پونتيكورڤو واليابانى مازامى ناكاجوا قد افترضا قبل ذلك بسنوات أن النيوترينات الإلكترونية والميونية (وهما النوعان المعروفان فقط فى الستينيات) يمكن أن تغير شكلها بهذه الطريقة، فإن القوة الدافعة لاكتشاف جسيم التو (Tau) والاهتمام المتنامى بمشكلة النيوترينو الشمسى، دفع المجربين إلى محاولة قياس هذا التأثير الافتراضى فى بداية الثمانينات من القرن العشرين. وكان الرجل الذى قبل التحدى خبيرًا فى اكتشاف النيوترينات وهو فردريك راينز (Frederick Reines)، الذى يعمل حاليًا مع هنرى سوبل وآلين پازيرب. وعاد راينز إلى موقع انتصاره المبكر فى مفاعل ساڤانا ريڤر، وحاول أن يكتشف هل تتغير النيوترينات الإلكترونية المنتجة فى المفاعل إلى نوعية أخرى من النيوترينات عند زيادة سرعتها. وكان الاختبار الذى استخدموه يتوقف على الطريقة المختلفة التى تتفاعل بها النيوترينات المختلفة مع أنوية الماء الثقيل (أكسيد الدوتريوم) الموضوعة فى صهريج على بعد ١١,٢ مترًا من قلب المفاعل.

إن بعض التفاعلات النووية التى تتضمن نيوترينات إلكترونية تنتج أثناء التفاعل اثنين من النيوترونات، فى حين أن التفاعلات النووية الأخرى التى تتضمن أنواعًا أخرى من النيوترينات لا تنتج سوى نيوترون واحد فى كل مرة. لكن لكى تختلط الصورة، فإن بعض النيوترينات الإلكترونية تعطى أيضًا نيوترونات مفردة، غير أن راينز وزملاءه كانوا على ثقة أن بإمكانهم، بالتحليل الدقيق استنتاج نسبة النيوترينات الإلكترونية التى تحولت (إذا كان هناك مثل هذا التحول) إلى النوعيات الأخرى من النيوترينات خلال

الرحلة القصيرة إلى مكشافهم. لقد ادعوا فى ربيع عام ١٩٨٠ أنهم وجدوا دليلاً على هذا التحول فى نوعية النيوترينو لكن هذه الادعاءات لم تصمد للفحص والتدقيق. واثبتت تجارب أخرى عدم وجود دليل على مثل هذا التحول، ومثل ادعاءات السوفيت الخاصة بقياسات كتلة النيوترينو، يظل ادّعاء راينز وفريقه، بأنهم رصدوا فعلاً تذبذبات النيوترينو، مثار جدل. غير أن الفكرة كما قلت من قبل، يمكن على الأقل إخضاعها مبدئيًا للتجربة.

وظل الحال على ما هو عليه حتى ربيع عام ١٩٨٦. حيث ظهر فجأة مرة أخرى على مسرح الأحداث خبير فى الفيزياء الشمسية، إنه هانز بث الذى قدم فى عام ١٩٣٨ مع شارل كريتشفيلد تفاصيل سلسلة البروتون ـ بروتون (P- P.) التى تحتفظ بالشمس ساخنة. وقد تبنَّى ونشر هذه المرة اقتراحًا لحل مشكلة النيوترينو الشمسى قام بتطويره اثنان من الباحثين السوفيت، هما: إس. پى ميكيف (S.P. Mikheyev) وأيه. يو. سميرنوف (A.yu. Smirnov)، على أساس اقتراح قدمه عالم فيزياء أمريكى هو لنكولن ولفنستين (Lincoln Wohlfenstein) . لقد أسر خيال العلماء والجمهور على حد سواء ذلك الاهتمام الإنسانى بعالم يعود بعد حوالى خمسين عامًا إلى مجال بحث كان رائدًا فيه، وضمَّن ذلك دفعة دعاية للرؤية الجديدة لفكرة تذبذب النيوترينات. وتستحق هذه الفكرة أن نذكرها باختصار، وإن كانت الأحداث قد تجاوزتها بعد ذلك.

إن الفكرة الرئيسة لموضوع تغير النيوترينو طبقًا لميكيف ـ سميرنوف ـ ولفنستين (M -S - W) هى أن هذا التحول الذى يطرأ على النيوترينات الإلكترونية إلى أنواع أخرى يجب أن يحدث "داخل" الشمس، كنتيجة للتفاعل بين النيوترينات والمادة التى تتكون منها الشمس. مرة أخرى، يتعين أن يكون لبعض النيوترينات المعنية كتلة. لكن هذه المرة، ثبت أن الكتلة يجب أن تكون صغيرة، وأن النيوترنو الإلكترونى ذاته لا يحتاج بالضرورة أن يكون له كتلة. وطبقًا لنموذج (M - S - W)، فإن النيوترينات الإلكترونية لا تقوم إلا بتفاعل ضعيف جدًا مع الجسيمات الشمسية وهى فى طريقها إلى خارج الشمس. وتأثير ذلك هو زيادة الطاقة التى تحملها النيوترينات، وبما أن الكتلة قابلة للتحول لطاقة والعكس صحيح، فإن ذلك يكافئ زيادة كتلتها ـ ولكن ليس بالقدر الكبير. وعندما تزيد كتلة النيوترينو الإلكترونى عن كتلة النيوترينو الميونى، فإن الأول ينحل إلى الثانى. غير أن النيوترينو الميونى عندما يتكون بهذه الطريقة فإنه لا يتغير مرة أخرى إلى نيوترينو إلكترونى.

إن كمية الكتلة ـ الطاقة التى يستطيع أن يلتقطها نيوترينو إلكترونى بهذه الطريقة تتوقف على كثافة المادة فى الشمس، وهى كثافة صغيرة جدًا؛ الأمر الذى يحد من المدى الممكن لكتل النيوترينات، إذا كان هذا التأثير يعمل بالشكل المفترض. خاصة ، أن كتلة النيوترينو الإلكترونى يجب أن تكون أساسًا صفرًا، وكتلة النيوترنو الميونى لا تتعدى ٠,٠١٪ إلكترون ڤولت. وقد يبدو ذلك غير قابل للتصديق ومن غير المحتمل، وتخمينًا مثل أى من "حلول" حفل الكوكتيل لمشكلة النيوترينو الشمسى، باستثناء، حقيقة، أن هناك مجموعة من النظريات تتنبأ بأن كتلة النيوترينات يجب أن تتراوح بين ٠,٠٠٠٠١ إلكترون ڤولت ومائة إلكترون ڤولت. ويُطلق على هذه النظريات اسم نماذج «الأرجوحة"، وهى تمثل إحدى محاولات المنظرين للعثور على إطار رياضى يمكن من خلاله وصف كل العالم المادى ـ نظرية موحدة كبرى. لكن هناك نسخًا أخرى للنظريات الموحدة الكبرى، وإن كان نموذج الأرجوحة هو المفضل هذه الأيام، وهو ما لا يعنى الكثير فى الحقيقة.

غير أن الذى نسف، فى الحقيقة، تفسير (M - S - W) لتجربة داڤيز، هو شىء حدث منذ زمن بعيد فى مجرة بعيدة، بعيدة جدًا.

ارتباطات كونية

فى بداية عام ١٩٨٧، رصد علماء الفلك انفجارًا ضوئيًا من نجم فى مجرة سحابة ماجلاًن الكبيرة، وهى مجرَّة صغيرة جارة لمجرة درب اللبانة. وكون هذا النجم المتفجر ما يُعرف بالسوبرنوڤا (*)، وأصبح هذا الحدث يُعرف بسوبرنوڤا «أيه» ١٩٨٧ (1987A). إن المسافة إلى مجرة سحابة ماجلاًن الكبيرة هى ١٦٠ ألف سنة ضوئية، ومعنى ذلك أن ضوء الانفجار حدث منذ ١٦٠ ألف عام، عند قياسه على الأرض، فى رحلته إلينا عبر الفضاء. لقد حدثت السوبرنوڤا بالفعل منذ ١٦٠ ألف سنة مضت قبل بداية أحدث عصر جليدى على كوكب الأرض. وهى أقرب سوبرنوڤا تم رصدها من الأرض منذ اختراع التلسكوب، وكانت موضوع جدل وبحث وفحص شديد. وكانت أيضًا أول سوبرنوڤا يتم رصدها ليس فقط بواسطة الضوء المرئى، ولكن بالنيوترينات التى تم إنتاجها أثناء الانفجار.

(*) نجم متفجر فائق التوهج. (المترجم).

وسجلت تجربتان فى مناطق مختلفة من العالم ظهورًا مفاجئًا للنيوترينات التى تم تفسيرها الآن بأنها ناشئة عن السوبرنوفا. التجربة الأولى فى كاميوكا، بوسط اليابان، حيث استخدم فريق بحث مكشافًا، عبارة عن صهريج يحتوى على ٢,١٤٠ طن من الماء كجزء من برنامج يحاول تحديد ما إذا كانت البروتونات تنحل. وهذا المكشاف شديد الحساسية للنيوترينات أيضًا (فهو فى الحقيقة، المكشاف الذى أكد دقة تجربة داڤيز)، شريطة أن يكون لدى هذه النيوترينات بعض الطاقة. وعندما وردت أنباء السوبرنوڤا، فتش الفريق اليابانى مرة أخرى فى سجلاته ووجد أن تجربته "رصدت" تفجر ١١ حالة رصد للنيوترينو فى مدى ١٣ ثانية، بمستويات طاقة تتراوح بين ٧,٥ إلى ٣٦ ميجا إلكترون ڤولت. وفى التجربة الثانية قامت جامعتا إيرڤين وميشجان بالاشتراك مع معمل بروكهاڤن القومى، قرب كليڤلند بولاية أوهيو، بتشغيل مكشاف مماثل. ولقد رصد هذا المكشاف نبضة نيوترينات فى الزمن الصحيح ـ ثلاث نبضات فى مدى ست ثوانٍ، وبمستويات طاقة تتراوح بين ثلاثين ومائة ميجا إلكترون ڤولت (هذه المستويات من الطاقة تتجاوز بكثير مستويات طاقة النيوترينات الشمسية، والتى لا يمكن رصدها بهذه التجارب). إن تماثل النتائج الواردة من اليابان والولايات المتحدة، بالإضافة إلى حقيقة أن أغلب النيوترينات وصلت فى الثانية الأولى للنبضة، قد أقنعت العلماء أنها فعلاً نيوترينات سوبرنوڤا "A" ١٩٨٧. ولقد وضعت كثافة الانفجارات حدودًا دقيقة لكتلة النيوترينو.

إذا كانت كتلة النيوترينات صفرًا، فإنها ستنتقل جميعها بسرعة الضوء وستصل كلها معًا حتى بعد رحلة طولها ١٦٠ ألف سنة ضوئية. لكن إذا كان للنيوترينات كتلة ـ حتى لو لها جميعا الكتلة نفسها ـ فإن سرعة تحرُّكها ستتوقف على طاقتها. وكما يحدث تمامًا لكرة البيسبول التى تضرب بقوة أكبر حيث تطير أسرع عبر الهواء، فإن النيوترينات التى تمنح قوة الاندفاع الأكبر فى انفجار السوبرنوڤا ستنتقل فى الفضاء بسرعة أكبر وتصل أولاً. ويصبح هذا التأثير أكثر وضوحًا إذا كانت كتلة النيوترينات أكبر. إن وصول عدة نيوترينات ذات مستويات طاقة مختلفة على التوالى بحيث يفصل بين كل منها ثانية واحدة، بعد رحلة ١٦٠ ألف سنة ضوئية، يبين أن كتلة هذه النيوترينات لا بد أنها أقل من ١٥ إلكترون ڤولت، وهو أفضل حد وضع حتى الآن. إن ذلك يتعارض بالطبع مع مزاعم السوڤيت ولكنه يتفق مع كون كتلة النيوترينات صفرًا، أو أن لها كتلة صغيرة، وهو ما لا غنى عنه لكى تكون حيلة (M - S - W) صالحة. لكن على الأقل هناك باحث يعتقد أن

بإمكانه جعل الأمور تتقدم خطوة إلى الأمام، وهو رمانثان كوزيك (Ramanathan Cowsik) من معهد تاتا فى بومباى.

ففى لقاء لعلماء الفلك فى المجر فى يونيو ١٩٨٧، اقترح كوزيك أنه بدلاً من أن تكون هناك نبضة من النيوترينات قادمة من السوبرنوفا فى مدى ١٣ ثانية، فإن هناك نبضتين مثلاً، تفصل بينهما ثوانٍ قليلة. وإذا كان هذا التفسير صحيحًا، فإن ذلك يقضى بأن إحدى هذه النبضات تمثل وصول النيوترينات الإلكترونية، وأن كتلة هذه النيوترينات حوالى أربعة إلكترون فولت لكل منها، أما النبضة الثانية فهى إما كلها نيوترينات ميونية أو أن جميعها نيوترينات تونية، نسبة إلى التو، وكل نيوترينو فى هذه النبضة ستكون كتلته ٢٢ إلكترون فولت. وهو ما قد يسحب البساط تمامًا من تحت فرضيات (M- S - W). وطبقًا لكوزيك، هناك احتمال واحد إلى خمسة أن يكون نموذج النيوترينات الذى شوهد قد ظهر بالصدفة، وألا تكون للنيوترينات هذه الكتل.

إن ما يسلبه هذا التفسير من الفلك بيد ("حل" لمشكلة النيوترينو الشمسى)، يعطيه باليد الأخرى. فإذا كانت كتلة مجموعة من النيوترينات، تضم نيوترينو من كل نوع، تزيد على ١,٤ إلكترون فولت، فإن مجموع كتلة كل النيوترينات فى الكون ستزيد على كتلة كل النجوم المضيئة فى كل المجرات مجتمعة معًا. وقد يرحب بعض علماء الفلك بذلك، لأن هناك الآن وزنًا ساحقًا من الأدلة على أن النجوم المضيئة والمجرات تشكل أقل من ١٠٪ من كل المادة فى الكون، وأن الأمر يحتاج إلى شكل ما من "المادة المعتمة" لكى تتماسك الأشياء معًا من منطلق قوة الجاذبية.

إن الكون يتمدد حاليًا، وبمرور الوقت تتحرك المجرات بعيدًا عن بعضها البعض. وأحد الأسئلة الكبرى فى علم الكونيات (*) (Cosmology) فى الوقت الراهن هو: هل سيستمر التمدد إلى الأبد، أم سينقلب ذات يوم ويصبح انكماشًا، عندما تتغلب قوة جاذبية كل المادة فى الكون على قوة التمدد؟ هناك ما يكفى تقريبًا من المادة (المرئية المضيئة للقيام بالعمل، لكن الكتلة المشتركة لأنواع النيوترينات الثلاثة والتى تُقدر بخمسة وعشرين إلكترون فولت قد تفى بالغرض. وببساطة، يوجد عدد كبير جدًا من النيوترينات حولنا بحيث إنه حتى لو كانت كتلة كل منها صغيرة جدًا، فإن مجموعها قد يزيد على كتلة النجوم والمجرات مجتمعة.

(*) كوزمولوچيا: علم الكونيات: علم يبحث فى أصل الكون وبنيته العامة وعناصره ونواميسه.

وبالتالى، فإن لدراسة أحداث محلية فى فنائنا الكونى ـ مشكلة النيوترينو الشمسى ـ تأثيرًا رئيسًا على فهمنا لمسائل كونية عميقة مثل المصير النهائى للكون. لقد أصبح الاهتمام بحل مشكلة النيوترينو الشمسى أكثر من أى وقت مضى. والآن ونحن نتقدم فى التسعينيات من القرن العشرين؛ هناك إمكانية إنتاج جيل جديد من المكشاف لدراسة النيوترينات الشمسية العديدة التى لم يمكن دراستها بواسطة مكشاف داڤيز الذى قدم عملاً من الطراز الأول طوال عقدين.

مشاريع مستقبلية

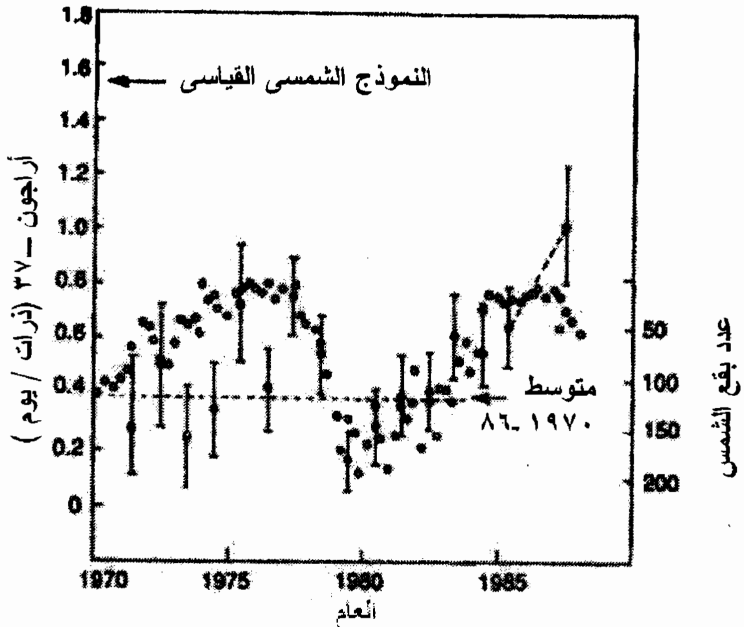
إن الدراسة الفلكية للنيوترينو الشمسى تحتاج حاليًا إلى تجربة جديدة ـ بل إلى عدة تجارب جديدة. لا يوجد سوى مجموعة أساسية واحدة من البيانات، مستمدة من تجربة واحدة فقط، وهى تقول لنا فقط إن هناك نيوترينات تصل إلى كوكب الأرض. إن مكشاف كاميوكند أكد فقط أن تجربة داڤيز تعمل بشكل سليم، لكنه لم يضف معلومات جديدة. وبشكل دقيق، طالما أن مكشاف داڤيز لا يستطيع أن يخبرنا بالاتجاه الذى تأتى منه النيوترينات، فإننا لا نعلم ما إذا كان يرصد بالفعل نيوترينات شمسية، وإن كان من الصعب التشكك فى ذلك نظرًا لعدم وجود مصدر كونى آخر فى النطاق. لاتزال هناك طرق لجمع المزيد من المعلومات بواسطة هذه التجربة. على سبيل المثال، لقد بدا أن هذه التجربة تلمح إلى أن عدد النيوترينات المسجل فى الصهريج يتوقف على نشاط الشمس، ويتغير هذا العدد على امتداد الأحد عشر عامًا التى هى مدة "دورة بقع الشمس". ويمثل ذلك نتيجة غير متوقعة على الإطلاق، ويصعب تفسيرها، نظرًا للاعتقاد بأن النيوترينات تأتى من قلب الشمس، فى حين أن بقع الشمس ظاهرة سطحية.

وسأعرض لمزيد من التفاصيل عن طبيعة بُقَع الشمس (كَلَف الشمس) فى الفصل السادس. لكن ما يهم هنا هو أن هذه البقع الغامضة تأتى وتذهب فوق سطح الشمس فى دورة تمتد حوالى أحد عشر عامًا تقريبًا. إن افتراض رصد مزيد من النيوترينات الشمسية على كوكب الأرض عندما يكون هناك مزيد من بقع الشمس، لا يُعتبر فكرة مجنونة "تمامًا"؛ لأن البقع مرتبطة بزيادة النشاط المغناطيسى فى الشمس، وكما سبق أن أشرت فإن تغير النشاط المغناطيسى قد يؤثر على تذبذبات نوع النيوترينو. ومن ناحية أخرى، إذا كان الأمر كذلك، فإن حالات التفجر العارضة للشمس والتى تُسمى

انفجارات مضيئة وترتبط كذلك بالنشاط المغناطيسى، قد تُزيد أيضًا عدد النيوترينات القابلة للرصد. لكن بحثًا قام به فريق بحث كاميوكند وغطى الفترة من يوليو ١٩٨٣ إلى يوليو ١٩٨٨ أثبت عدم وجود إشارات نيوترينو ذات دلالة فى فترة الانفجارات الشمسية. وهناك احتمال آخر، هو أن تكون الأشعة الكونية الشمسية، وهى جسيمات ذات طاقة تنتجها الشمس، بإمكانها أن تنتج نيوترينات بتأثير التفاعلات التى تحدث فى الغلاف الجوى للأرض. غير أن چون باكول يعتقد أن الارتباط الظاهرى بين بقع الشمس والنيوترينات الشمسية (شكل ٤ ـ ٥) مجرد صدفة. ويقول إن الاختبارات الإحصائية بينت إمكان حدوث مثل هذا الارتباط القوى بالصدفة البحتة فى ٢٪ من الحالات، حيث يتم وضع مجموعات عشوائية من البيانات بجانب بعضها البعض. وأشار إلى أن احتمال حدوث العديد من الأمور المهمة فى حياتنا، مثل سلسلة الأحداث التى تقود إلى أول لقاء لنا مع رفيق حياتنا يمثل أقل من ٢٪. إن مثل هذه الأحداث النادرة تحدث بالطبع! ومن ناحية أخرى، يعتقد راى داڤيز أن الارتباط حقيقى. وقد كرر باكول وداڤيز رهان پولى الشهير وإن كان هذه المرة أكثر تواضعًا، حيث وعدا بزجاجة شمپانيا لصاحب التجارب التى تثبت هذا التطابق أو الصدفة.

وقد أُجريت هذه التجارب بالفعل فى الوقت الراهن، فلقد ارتفع نشاط الشمس إلى ذروة فى أواخر عام ١٩٨٩، أى وأنا أكتب هذا الفصل، وسوف ينخفض هذا النشاط مرة أخرى بعد عام ١٩٩٢ تقريبًا. ومن المفترض أن تعطى عمليات الرصد حتى حوالى عام ١٩٩٥ الاختبار النهائى لهذا الارتباط الغريب. وهو ما يمثل سببا كافيًا لاستمرار تشغيل مكشاف داڤيز. لكن يصعب توقع أى تقدم مفاجئ يأتى بجديد من هذا المكشاف.

لقد اقترح بعض الباحثين البحث فى السجلات أو القيام بعمليات رصد جديدة لاكتشاف ما إذا كانت أعداد النيوترينات التى تصل خلال النهار، عندما تكون الشمس فى كبد السماء أكبر منها أثناء الليل. ومرة أخرى، يجب ألا يكون لذلك أى تأثير ـ "فمن المفترض" أن تمر النيوترينات عبر كوكب الأرض الصلب وكأنه غير موجود. ولكن إذا كانت النيوترينات الشمسية لا تتوافق لسبب ما، مع التوقعات، فقد يكون من الأجدى اختبار صحة ما "يعرفه الجميع" عن قدرتها على المرور عبر كوكب الأرض. وقد تفترض بعض التغيرات فى فكرة (M. S. W) أن تحدث ذبذبات فى الواقع، داخل كوكب الأرض، ولا بد أن ينجم عنها تأثير يومى قابل للقياس. غير أن مثل هذه الاختبارات تتجاوز حدود «تلسكوب» منجم الذهب.



شكل (٥ ـ ٤): مع بيانات ما يقرب من عشرين عامًا الخاصة بالنيوترينو الشمسى (النقط الغامقة) يبدو الأمر وكأن هناك ارتباطًا مع عدد بقع الشمس (الدوائر المفتوحة). ولا بد أن تدلنا المشاهدات خلال السنوات القليلة القادمة ما إذا كان هذا التأثير حقيقيًا أم لا.

على أية حال، لا يوجد نقص فى الأنواع الجديدة المقترحة من تلسكوبات النيوترينو كانت المكشافات التى تستخدم تكنولوچيا تُعتبر فى عقد الستينيات إما مكلفة جدًا، أو من الصعوبة بمكان مجرد التفكير فيها. ولو كان داڤيز قد كشف عن عدد النيوترينات المتوقع بالكامل، لاعتبر أغلب هذه الأفكار مكلفًا جدًا ولفقد الاهتمام بها. غير أن الألغاز التى أظهرتها مشاهداته طوال عشرين عامًا جعلت من المُجْدى الآن ـ بل من الضرورى قياس مستوى طاقة النيوترينات، والاتجاهات التى تأتى منها وأنواع النيوترينات ذاتها. وإننى أعرف على الأقل اثنى عشر نوعًا مختلفًا من التجارب المطروحة حاليًا لقياس بعض الصفات الخاصة بالنيوترينات الشمسية. ويمكن تطبيق كل واحدة من هذه التقنيات الاثنتى عشرة بعدة طرق مختلفة. وسأذكر منها فقط تلك التى تعدُ بفرصة واقعية للتطبيق خلال السنوات القليلة القادمة.

إن الخطوة المنطقية التالية هى بناء مكشاف يستجيب للنيوترينات ذات الطاقة المنخفضة التى يتم إنتاجها بكميات كبيرة بواسطة تفاعل البروتون ـ بروتون (P -P.). ومن الأفكار التى تتصدر هذا السباق، تجربة تستخدم الجاليوم لالتقاط النيوترينات. إن التجربة بسيطة مبدئيًا، وتتوقف على حقيقة أنه عندما يتفاعل نيوترينو إلكترونى مع

نواة جاليوم ـ ٧١ فإنها تتحول إلى نواة جرمانيوم ـ ٧١ وينبعث من التفاعل إلكترون واحد. ودون الدخول فى تفاصيل، فإن علماء الكيمياء سعداء لأن بإمكانهم إحصاء عدد ذرات الجرمانيوم الناتجة، باستخدام تقنيات مشابهة من حيث الفكرة لتلك التى استخدمها داڤيز لإحصاء ذرات الأراجون. إن الميزة الكبيرة للجاليوم ـ ٧١ أنه يتفاعل مع نيوترينات البروتون ـ بروتون (p-p.) ، لكن العقبة المباشرة لمكشاف الجاليوم هى تكلفته العالية، إضافة إلى مشكلة ثانوية وهى أن التجربة ستعطى إجابة ملتبسة لأسئلتنا عن النيوترينات الشمسية.

إن الجاليوم فلز ذو نقطة انصهار منخفضة جدا. إذا أمسكت بكتلة منه فى يدك فإنه ينصهر إلى بركة لامعة تبدو كبركة صغيرة من الزئبق. كما إنه فلز قيِّم جداً يُستخدم فى الصناعة الإلكترونية لإنتاج صمامات ثنائية مشعة للضوء، ذلك النور الأحمر الصغير المألوف فى الآلات الحاسبة والمكونات الأخرى للمعدات الإلكترونية. وبينما يجرى طبع هذا الكتاب، قد يصبح زرنخيد الجاليوم من أشباه الموصّلات الشائعة الاستخدام، بحيث يعطى جيلاً من المعدات الإلكترونية أسرع من الموجودة حاليًا. كل ذلك يجعل الجاليوم نافعًا ومطلوبًا فى الصناعة الحديثة، غير أنه نادر أيضًا، حيث يقل إنتاجه سنويًا عن مائة طن، فيما يحتاج مكشاف جيد للنيوترينو الشمسى إلى ثلاثين طنًا على الأقل، وربما ستين طنًا، له وحده. إن تكلفة الجاليوم بالنسبة للمكشاف ستتراوح بين خمسة ملايين وعشرة "ملايين" دولار، بالأسعار الحالية ـ غير أن العلماء سرعان ما لفتوا الانتباه إلى إمكانية بيعه للاستخدام فى الصناعات الإلكترونية بعد الانتهاء منه!

ومع ذلك، فإن فريقًا من الباحثين السوڤيت يخطط بالتعاون مع فريق من الباحثين الأوروبيين لتنفيذ مثل هذه المشروعات، يحدوهم الأمل أن تجربة الجاليوم برصدها نيوترينات البروتون ـ بروتون (p - p.) تكون حلت لغز لماذا رصد داڤيز ثلث عدد النيوترينات المتوقعة فقط. وطبقًا للنموذج القياسى، فإن مثل هذا المكشاف يجب أن "يرى" حوالى ١٢٠ وحدة نيوترينو شمسى (SNU)، ٧٠٪ من هذه النيوترينات قادمة من عملية بروتون ـ بروتون (p-p) وأغلب الـ٣٠٪ المتبقية من تفاعل البريليوم ـ٧. وإذا وجد المكشاف الجديد ثلث عدد النيوترينات المتوقعة، فإن ذلك يوحى طبعًا بأن النيوترينات تتذبذب بين ثلاثة أنواع وهى فى طريقها من الشمس إلى الأرض، ما دامت عملية

البروتون ـ بروتون (p-p.) ليست شديدة الحساسية لدرجة الحرارة فى قلب الشمس. أما إذا كانت نيوترينات البروتون ـ بروتون موجودة بالكميات المتوقعة تقريبًا، فإنه يمكن تفسير ذلك بإحدى طريقتين. فقد يعنى ذلك أن هناك مشكلات مع الفيزياء الفلكية التى تؤثر فقط على نيوترينات داڤيز (مثل أن تكون درجة حرارة قلب الشمس أقل بنسبة ١٠٪ عن النموذج القياسى). وهو ما قد يؤثر على نيوترينات البورون ـ ٨، وليس على نيوترينات البروتون ـ بروتون (p-p). أو أن يترك ذلك مجالاً لافتراض(M-S-W) القائل بوجود خليط من أنواع النيوترينو المختلفة "داخل" الشمس، طالما أن هذه العملية ذاتها لا تعمل إلا بالنسبة للنيوترينات ذات الطاقة العالية.

وهناك طرح آخر يتضمن استخدام فلز الإنديوم بدلاً من الجاليوم لرصد النيوترينات الشمسية. ويخطط نورمان بووث (Norman Booth)، الباحث بجامعة أكسفورد، لتجربة تستخدم طنًا من الإنديوم ـ ١١٥، الذى يجب أن يلتقط نيوترينًا شمسيًا واحدًا كل ثلاثة أيام أو أربعة أيام. وعندما يحدث ذلك، تتحول نواة الإنديوم ـ١١٥ إلى نواة قصدير ـ ١١٥ ويتحرر إلكترون. ولأن القصدير يتولد بطاقة زائدة ـ أى فى حالة استثارة ـ فإنه يرتد على الفور إلى أكثر حالاته استقرارًا، ويشع زوجًا من الفوتونات (أشعة جاما) التى يمكن رصدها بسهولة نسبيًا. وتتميز هذه التقنية بأن ومضات أشعة جاما، المعلنة عن وصول النيوترينات، سيتم رصدها لحظيًا، فى "الوقت الحقيقى"، بمجرد وصول النيوترينات، بدلاً من أن يضطر العلماء إلى الانتظار لأيام أو أسابيع قبل القيام بما يكافئ غسل الصهريج وتفريغه وإحصاء عدد النيوترينات التى وصلت على امتداد فترة زمنية طويلة. ولكن يعيب هذه التقنية أن الإنديوم ـ ١١٥ عنصر مشع طبيعيًا، وسينبعث من طن واحد منه مائتا ألف إلكترون كل ثانية. غير أن بووث يعتقد أن بإمكانه التحايل على مشكلة هذه "الخلفية" الضخمة من الإلكترونات التى تهدد بإغراق مكشافه.

ومن ناحية أخرى، تقدم مجموعة أطروحات حلولاً تعتمد على حقيقة أن النيوترينات تستطيع ببساطة ضرب الإلكترونات ـ بعثرتها كما يُقال ـ وبذلك تزودها بالطاقة. إن مثل هذا الحدث نادر، لكن إذا كان لدينا عدد كافٍ من الإلكترونات فى مكشاف، وعدد كافٍ من النيوترينات تمر خلاله، فمن المؤكد أن يحدث ذلك فى بعض الأحيان. لو قمت ببناء صهريج كبير يحتوى على القدر الكافى من أى شىء، طالما أن كل الذرات تحتوى

على إلكترونات، فإن بعض النيوترينات الشمسية التى تمر خلاله ستزود بعض الإلكترونات الموجودة فى الصهريج بالطاقة. "كل" ما عليك عمله هو التقاط الإلكترونات التى تتحرك بسرعة واستنتاج مكان حدوث التصادم - إنه عمل ليس بالسهل إطلاقًا، ولكنه عمل روتينى بالنسبة لعلماء الفيزياء العاملين فى مجال الجسيمات الأساسية.

إن المكشافات التى "وجدت" النيوترينات القادمة من سوبرنوفا «أيه» ١٩٨٧ تعمل بهذه الطريقة، لكنها لم تتمكن بعد من رصد النيوترينات ذات الطاقة المنخفضة مثل تلك القادمة من الشمس. وتتميز هذه التقنية بأنها تعمل بشكل لحظى فى الزمن الحقيقى، وتسجل النيوترينات عند وصولها، كما يمكنها مبدئيًا استنتاج طاقة النيوترينات القادمة واتجاهها. لكن يعيبها كمية المادة الضخمة التى تحتاجها. ومن بين الأفكار المطروحة للقيام بهذا العمل، وضع صهريج به ٦٦٠٠ طن من الأراجون السائل فى نفق جران ساسو تحت جبال الألب. وقد سُميت هذه التجربة Icarus (وهو اختصار مُلتوٍ لعملية تمثيل الإشارات الكونية والإشارات التحت أرضية النادرة)، وقد تستطيع قياس مستويات الإلكترونات، وتستدل بذلك على مستويات طاقة النيوترينات القادمة.

إن هذا الطرح جدير بالذّكر لأن أحد علماء الفيزياء المشاركين فيه هو چون باكول، المرجع العالمى لنظرية تفاعلات النيوترينو الشمسى. وطبقًا لحساباته، يتعين على المكشاف أن "يعثر" على ٤٧٠٠ نيوترينو شمسى فى العام. ويّدعى باكول أن هذا المكشاف قد يكون قادرًا على تأكيد (أو دحض) دقة النموذج الشمسى القياسى خلال يوم واحد من التشغيل.

إن الحجة بسيطة بشكل يسد الطريق على أى اعتراض. وطبقًا للنظرية القياسية، فإن مستويات طاقة الإلكترونات التى يتم رصدها فى مكشاف إيكاروس (التى اكتسبتها من النيوترينات الشمسية) يجب أن تكون موزعة بالتساوى حول قمة تُقدر بخمسة ميجا إلكترون ڤولت، مع عدد التفاعلات نفسه عند ثلاثة ميجا إلكترون ڤولت، مثلاً، وعند سبعة ميجا إلكترون ڤولت. إلا أن أى نوع من ذبذبات النيوترينات سيغير توزيع مستويات الطاقة، إلى أعلى أو إلى أسفل تبعًا للنظرية التى تفضلها. وإذا وجدت إيكاروس عددًا قليلاً جدًا من الإلكترونات على جانب واحد من القمة (لا يهم أية ناحية)، فإن ذلك سيُعد إشارة أكيدة على أن الذبذبات قائمة وفى حالة عمل، وهو ما يعنى ضمنيًا أن النموذج القياسى للشمس صحيح، وأن النيوترينات نفسها هى التى تقوم بهذه الحيلة.

لا تزال هناك طرق أخرى لرصد وصول النيوترينات الشمسية فى المعمل. فإن بلاس كابريرا (Blas Cabrera) الباحث بجامعة ستانفورد يستخدم ما يُعرف بمكشاف لقياس الطاقة الإشعاعية الحرارية. وتعتمد هذه التجربة على أبسط المفاهيم على الإطلاق، وهو أن النيوترينو عندما يتفاعل مع نواة ذرة ما يُنتج إلكترونًا ذا طاقة كبيرة. وبدلاً من محاولة رصد الإلكترون نفسه، فإن كابريرا خطط لقياس الطاقة بشكل غير مباشر، عن طريق ارتفاع درجة حرارة المكشاف الناجم عن ذلك. وتلك التجربة ممكنة عمليًا، شريطة أن يكون المكشاف عند بداية التجربة باردًا وأن تكون ذراته مرتبة فى بلورة صلبة. ففى هذه الحالة، عندما ينطلق الإلكترون المنبعث من إحدى الأنوية فإنه يصطدم بالذرات الأخرى المجاورة، ويحركها فى ذبذبة صغيرة. إن اهتزاز تلك الذرات يكافئ ارتفاعًا فى درجة الحرارة ـ تتحرك الذرات الباردة حركة ضعيفة على نقيض الذرات الساخنة فتكون حركتها وافرة. وبالتالى، إذا بدأت ببلورة من السليكون شديدة البرودة، وتعرضت هذه البلورة لاصطدام نيوترينو بها بحيث تمتص طاقته، فمن المتوقع أن يحدث ارتفاع طفيف فى درجة حرارة بلورة السليكون. وتكمن الحيلة هنا فى قياس هذا الارتفاع الطفيف فى درجة الحرارة ـ ويتعين عليك بالطبع أن تقوم بتشغيل كل شىء عند درجات حرارة قريبة من الصفر المطلق، حيث يكون الهليوم سائلاً.

ويتضمن تناول كابريرا التدريجى للمشكلة خُططًا لبناء نموذج مكشاف يستخدم كيلوجرامًا واحدًا من السليكون، فى البداية، ودراسة طريقة رد فعله عند قصفه بجسيمات ذات طاقة عالية وأشعة إكس. ويأمل بعد ذلك فى بناء مكشاف أكبر قد يحتوى مائة كيلوجرام من السليكون، ويضعه بجانب مفاعل نووى ليرى رد فعله على النيوترينات وعندئذ فقط يصبح مستعدًا لاستكمال تجربة كاملة الحجم للنيوترينو الشمسى، باستخدام عشرة أطنان من السليكون.

إن هذا الجدول الزمنى يعطيكم فكرة عن طول الفترة المتوقع انتظارها قبل الوصول إلى بيانات نهائية جديدة عن النيوترينات الشمسية. إن مكشاف الجاليوم أو تجربة إيكاروس أو مكشاف كابريرا لقياس الطاقة الإشعاعية الحرارية يفترض أنه أصبح جاهزًا للعمل مع بداية التسعينيات من القرن العشرين، مع توافر التمويل. وهناك أفكار أكثر غرابة قد يمكنها أن تثبّت التوزيع الكلى للنيوترينات الشمسية عند مستويات الطاقة المختلفة (طيفها)، لكنها لازالت غير قابلة للتنفيذ ولا يتوقع تطبيقها إلا فى القرن الواحد والعشرين. وبالرغم من ادعاءات العلماء المقتنعين بتجربة إيكاروس

المتفائلة، فإننى أشك بشكل ما فى أن يومًا واحدًا من التشغيل يكفى لحل اللغز. ففى عام ١٩٦٦، كان العديد من علماء الفيزياء (ربما كان باكول منهم) يمكنهم الزعم أن شهرًا واحدًا من المشاهدة والرصد بواسطة مكشاف دافيز يكفى لتأكيد دقة النموذج القياسى للشمس!

وبعد عقدين من الحيرة والارتباك حول نتائج مكشاف دافيز، قد يكون احتمال الانتظار لخمسة أو عشرة أعوام أخرى للوصول لرؤية واضحة للغز النيوترينات الشمسية أمرًا غير بعيد. وعند التخطيط لمثل هذه المشروعات طويلة الأجل الباهظة التكلفة، فإن من واجب المنظرين أن يحاولوا التنبؤ بما ستفضى إليه وتكشف عنه هذه التجارب، وأن يقدموا أفضل ما يمكنهم فى سبيل ذلك. فلقد أدت تجربة دافيز نفسها إلى تركيز أذهان علماء الفيزياء الفلكية فى الستينيات على تحسين وتنقيح حساباتهم الخاصة بالنموذج القياسى، ومن ثَم فإن الخطط الخاصة بجيل جديد من المكشافات تهيب بهؤلاء العلماء أن يقدموا تنبؤات وتوقعات قابلة للاختبار لما يمكن أن تكتشفه أو تجده هذه المكشافات. وهناك تحدٍّ آخر أمام المنظّرين، وهو استخدام ذكائهم ونبوغهم للوصول إلى حل مُرْضٍ لمشكلة النيوترينو الشمسى لا يتطلب إنفاق سنوات من الجهد وملايين الدولارات فى بناء مكشافات ووضعها فى حفر عميقة فى الأرض، ولكن حلاً يربط بين ما يحدث داخل الشمس والنجوم الأخرى وما يحدث فى الكون ككل (ليس مثل حلول حفلات الكوكتيل).

ويمكن للفلك الرصدى تقديم المساعدة أيضًا. ففى الثمانينيات من القرن العشرين، عندما كان علماء الفيزياء يتصارعون مع تصميمات مكشافات النيوترينو، وحققوا تقدمًا تكنولوجيًا نحو جيل جديد من التجارب، لم يكن علماء الفيزياء الفلكية والفلك كسالى أو متعطلين. فقد حسّنوا هم أيضًا أدواتهم وتقنياتهم، وكسبوا رؤية جديدة لطبيعة الشمس وسلكوا طرقًا جديدة لسبر أسرار قلب الشمس. ورغم كل شىء، تفترض هذه الرؤى الجديدة أن بعض مناقشات حفلات الكوكتيل المتعلقة بلغز النيوترينو الشمسى قد لا تكون مجنونة لهذه الدرجة.

ولكى نرى كيف يكون ذلك، تتعين العودة إلى عام ١٩٧٧، لنمسك بخيوط ما بدا فى ذلك الوقت فكرة غريبة أخرى عما يدور فى قلب الشمس، وذلك عندما كان عمر مشكلة النيوترينو الشمسى آنذاك أقل من عشر سنوات، وكانت حلول حفلات الكوكتيل لا تتعدى الاثنى عشر.

الفصل الخامس

فكرة غريبة أخرى

چون فولكنر (John Foulkner) عالم فيزياء فلكية بريطانى المَوْلِد، يعيش حاليًا فى كاليفورنيا، حيث يعمل فى كلية سانتاكروز التابعة لجامعة كاليفورنيا وفى مرصد ليك. وهو خبير مشهور فى فيزياء الأجزاء الداخلية من النجوم، أى قلبها، وكان قد اكتسب شهرته العلمية فى الستينيات من خلال أبحاثه عن طريقة تطور النجوم عندما تحتوى مصدرين للطاقة النووية، حيث يحترق الهليوم فى قلب هذه النجوم متحولاً إلى كربون، بينما تستمر طبقة من الهيدروچين خارج القلب فى الاحتراق وتتحول إلى هليوم. ولقد فسرت هذه الحسابات ظهور ما يُعرف بنجوم «الفرع الأفقى»(*). ووضعت بذلك القطعة الرئيسة الأخيرة من لغز تطور النجوم فى مكانها المناسب. وعندما بدأ الباحثون فى النصف الأخير من السبعينيات يهتمون بإمكانية وجود أنواع «جديدة» من الجسيمات فى الكون، وبأن وجود مثل هذه الجسيمات يمكن أن يؤثر على طريقة تطور النجوم، كان من الطبيعى أن يُعنى فولكنر بتلك التخمينات. غير أن أحدًا لم يكن يتصور فى البداية، أن تكون التخمينات وثيقة الصلة بقصة النيوترينات الشمسية.

(*) يأتى هذا الاسم من موضع هذه النجوم فى رسم تخطيطى يربط درجة سطوع النجم بلونه، ويُسمى: رسم تخطيطى H - R، نسبة إلى عالمى الفلك اللذين وضعا هذه الطريقة فى التصنيف وهما: - Hertezsprung. Russel. تقع نجوم مثل الشمس، التى تحرق الهيدروچين فى قلبها، فى نطاق على الرسم التخطيطى يُعرف بالسلسلة الرئيسة. فى حين تحتل النجوم العملاقة الحمراء والنجوم القزمة البيضاء مناطق خاصة بها من الرسم التخطيطى.

فى ذلك الوقت، بدأ العديد من علماء الفلك يتعاملون بجدية مع الفكرة القائلة بأن فى الكون قدرًا من المادة أكبر بكثير مما يمكننا رؤيته. لقد كانت النجوم المضيئة والمجرات المحتوية على مليارات النجوم المضيئة هى بؤرة الاهتمام الرئيس لعلم الفلك على امتداد السنوات، وذلك لأن الأشياء المضيئة فقط هى التى يمكن دراستها مباشرة، عن طريق الضوء الذى يصل إلى تلسكوباتنا. ولكن منذ الثلاثينيات بدأ العديد من علماء الفلك يتشككون فى أن الكون لا بد أن يحتوى على أكثر بكثير مما تراه العين، وكانت قلة من العلماء، تؤمن بذلك إيمانًا عميقًا. وتفترض الدراسات الخاصة بطريقة تحرك النجوم فى مجرة مثل مجرتنا، وتلك الخاصة بطريقة تحرك مجرات فى مجموعات (تُسمى جماعات المجرات) أن قوى جاذبية أقوى من قوة الجاذبية المشتركة لكل النجوم المضيئة المرئية مجتمعة تشد هذه المجرات والنجوم. ومن ثَم يتعين أن تكون هناك مادة معتمة فى الكون مثلما توجد مادة مضيئة. ولكن ما المادة المعتمة، وأين تجمعت واحتشدت؟

يُشار إلى المادة المعتمة أحيانًا على أنها «الكتلة المفقودة» ـ وهو اسم لم يعد مستحبًا بعد أن أقنع علماء الفلك أنفسهم خلال عقد الثمانينيات من القرن العشرين بأن المادة موجودة بالفعل وأن «المفقود» هو الضوء. فى البداية، كان الافتراض الطبيعى أن تكون تلك المادة المعتمة فى شكل نجوم باهتة جدًا، أو سُحب من الغازات لم تتكثف لتشكل نجومًا، أو حتى أشياء شبيهة بالكواكب، أعداد ضخمة من «المُشترِى» منتشرة عبر المجرة. لكن فى عقد السبعينيات أدت تطورات جديدة فى فيزياء الجسيمات إلى افتراض جديد جَسُور، يتلخص فى أن بعض، أو كل، «المادة المفقودة» لا بد أن يُعثر عليها فى شكل جسيمات لم يسبق رصدها قط فى أى معمل على الأرض، جسيمات تخلفت من الانفجار العظيم الذى ولد منه الكون.

رابطة الجسيم

فى البداية، لم يكن لدى علماء فيزياء الجسيمات أدنى فكرة باحتمال أن يكون لنظرياتهم الجديدة نتائج كونية غير مباشرة. لقد تركز اهتمامهم فى تطوير مجموعة موحدة من المعادلات يمكنها أن تصف سلوك قُوَى الطبيعة الأربع (الجاذبية، التفاعلات النووية القوية والضعيفة والقوة الكهرومغناطيسية) فى مجموعة موحدة واحدة. وفى البداية، توج النجاح الخطوة الأولى الضخمة على الدرب الموصل إلى هذه النظرية،

«نظرية كل شىء» (TOE)، وذلك بتجميع الكهرومغناطيسية والتفاعل النووى الضعيف فى حزمة واحدة، تُسمى نظرية الكهرباء الضعيفة. لكن بعض صور هذه النظرية تتطلب وجود نوع جديد من الجسيمات فى الكون ـ جسيم كتلته أكبر من البروتون. إن هذا الجسيم الخاص الذى تم تصوره فى حسابات من هذا القَبيل أُجريت عام ١٩٧٧، هو عبارة عن نوع من النيوترينو الثقيل. لكن هذا الطرح أُهمل مع تقدم النظريات وتحسنُّها، وحل محله مرشحان آخران لجسيمات المادة المعتمة، إلا أن هذا الطرح قدم قوة دافعة جعلت بعض علماء الفيزياء الفلكية يفكرون طبقًا لخطوط جديدة. إن هذا الجسيم لا يمكن قط إنتاجه فى مسارعات على الأرض مثل تلك الموجودة فى CERN بچنيف أو فى معمل Fermi بشيكاغو. إن الطاقة (E) المطلوبة لإنتاج جسيمات كتلتها (m) أكبر عدة مرات من كتلة البروتون، وتنطبق عليها معادلة آينشتاين: الطاقة = مربع الكتلة × سرعة الضوء، هى ببساطة طاقة غير متاحة. لكن علماء الفلك لديهم أدلة(*) قوية على أن الكون ذاته ولد منذ حوالى ١٥ مليار عام من حالة فرط احترار وفرط كثافة، هى الانفجار العظيم. إن الطاقة المتاحة فى الانفجار العظيم كانت وفيرة بحيث يمكنها تكوين أعداد كبيرة من هذه الجسيمات المفترضة ـ فى الحقيقة، إن طاقة من الانفجار العظيم هى التى تحولت إلى كتلة طبقًا لمعادلة آينشتاين وتم احتجازها فى شكل البروتونات والنيوترونات والإلكترونات الموجودة حاليًا فى جميع النجوم والكواكب وفى أجسادنا ذاتها. وإذا كان من الممكن أن يترك الانفجار العظيم خلفه بروتونات نيوترونات، فبالإمكان أيضًا أن يحدث ذلك مع تلك الجسيمات الثقيلة الأخرى. ولو انت هناك أعداد كافية من هذه الجسيمات، فإن تأثير الجاذبية الخاص بها يمكن أن يُضاف لتفسير طريقة حركة النجوم والمجرات، بل قد يساعد أيضًا فى تفسير كيف تكونت المجرات فى أول الأمر، من سحب غاز منهارة. لكن ما تأثير وجود مثل هذه الجسيمات على سلوك النجوم ذاتها؟

لقد تعلق اهتمام فولكنر بالمشكلة أثناء زيارة قام بها للمرصد القومى للفلك اللاسلكى بالولايات المتحدة وذلك فى عام ١٩٧٧، حيث التقى علماء فلك آخرين مهتمين بالسمات المختلفة للتداعيات الكونية لوجود جسيمات ثقيلة فى الكون لم يتم إدراكها من قبل. وقام ثلاثة من هؤلاء الباحثين، هم: جارى شتيجمان وكريج سرازين وهـ. كينتانا، بتوحيد جهودهم مع فولكنر لدراسة كيف يمكن أن يؤثر وجود هذه الجسيمات على

(*) راجع المؤلَّف المسمى «بحثًا عن الانفجار العظيم» لنفس الكاتب، الدورية الفلكية، المجلد ٨٣ ، ص١٠٥٠.

تطور الكون بشكل عام وعلى تكوين المجرات وسلوكها بعد تكوُّنها وسلوك النجوم. وانتهوا إلى أن الجسيمات التى تتراوح كتلتها بين ضعف كتلة البروتون وعشرين ضعف هذه الكتلة يمكن أن تمثل «مكونًا مهمًا بشكل فعال لكثافة كتلة الكون»، وأن هذه الجسيمات «يمكن أن تكون لها كل الصفات المطلوبة لتكوين «الكتلة المفقودة» فى جماعات المجرات وفى الهالات المجرِّية».

غير أن تأثير هذه الجسيمات الثقيلة يبدو ضعيفًا على النجوم، بما أنه ثبت فى النهاية أن عددًا قليلاً من هذه الجسيمات قد ينهار مع الهيدروچين والهليوم فى السُّحب التى تكونت منها النجوم - إن جسيمات المادة المعتمة تظل منتشرة على امتداد منطقة كروية واسعة تحيط بمجرة مثل مجرتنا («الهالات» التى أشار إليها الفريق). ومعنى ذلك أن المادة المعتمة، أيًا ما كانت، منتشرة وليست متركزة داخل النجوم المرئية. لكن فولكنر أصبح متحيرًا من إمكانية أن يكون القليل من هذه الجسيمات قد تجمع داخل قلب الشمس وغيَّر من تركيبه بما يكفى ليكون مسئولاً عن نقص عدد النيوترينات الذى سجلته تجربة داڤيز. على أية حال، لا يحتاج حل مشكلة النيوترينو إلا إلى تعديل درجة الحرارة التى حددها النموذج القياسى للشمس بنسبة ١٠٪.

وعند عودة فولكنر إلى سانتاكروز، جند الباحث رون چيليلند (Ron Gilliland) للقيام بالحسابات. وكان واثقًا من فكرته، ونجحت الحيلة. فإن إضافة جسيمات ثقيلة إلى قلب الشمس «يمكن» أن تبرده بدرجة تكفى لتقليل تدفق النيوترينات بحيث يطابق القياسات التى قام بها داڤيز. لكن زملاء فولكنر لم يتحمسوا لفكرة أن ينطوى بحثهم المشترك على حل لمشكلة النيوترينو الشمسى من نوع حلول حفلات الكوكتيل. وسمحوا له، على مضض، أن يسجل ملخصًا مختصرًا لبحثه مع چيليلند فى نهاية الجزء (جـ) من القسم الخامس من البحث، قبل الخاتمة مباشرة. وتنتهى الجملة الأخيرة من البحث بـ «أنه يمكن حل مشكلة النيوترينو الشمسى بدون التأثير بشكل جدى على السمات الأخرى لتطور النجوم». لكن لم يكن أحد يعتقد حينذاك - ولا حتى فولكنر نفسه - أن هذه الجملة كانت أهم سمة فى البحث المشترك. وكان فولكنر وچيليلند قد قاما فى عام ١٩٧٨ بكتابة وصف تفصيلى لبحثهما، استعدادًا لإعلانه على الملأ فى شكل مقال فى إحدى المجلات العلمية، إلا أن تعرضهما لهجوم من زملائهما يصف المفهوم ككل بالحماقة جعلهما يتخليان عن الفكرة. وسرعان ما دُفنت مُسوَّدة المقال تحت أكوام من

أوراق أخرى فى مكتب فولكنر فى سانتاكروز، وتم نسيانها سريعًا. وأصبح شتيجمان مقتنعًا أن حججًا جديدة أعلنت أن وجود النيوترينات الثقيلة غير وارد ولا مجال للبحث فيه. وبالرغم من أن فولكنر كان يعرض أحيانًا فكرته فى لقاءات علمية، فإن رد الفعل غير المتحمس كان يثبط همته فى أن يصر على القضية ـ ومع ذلك فإنه الآن يتذكر باعتزاز أن موراى چل ـ مان (Muray gel - Mann) الحاصل على جائزة نوبل، كان من بين القلائل الذين أُعجبوا بالفكرة فى بداية الثمانينيات من القرن العشرين.

لكن فى الوقت الذى أخمد فيه زملاء فولكنر حماسه للفكرة، كان المنظِّرون فى عالم فيزياء الجسيمات، فى بداية الثمانينيات، يسرعون الخطى بإصرار يفوق إصرارهم فيما مضى وصولاً إلى الخلاصة القائلة إن شكلاً ما من الجسيمات «الإضافية» يجب أن يوجد فى الكون، حتى ولو لم تكن هذه الجسيمات نيوترينات ثقيلة. وفى الوقت نفسه، اكتشف علماء الفلك المزيد من الأدلة على وجود مادة معتمة تمارس عبر الكون تأثيرها الخاص بقوة جاذبيتها. وأصبح الأمر مسألة وقت إلى أن يقوم شخص آخر بتوحيد مجموعتَى الأفكار. وكان هذا الشخص هو وليم پرس (William Press)، من مركز هارفارد ـ سميثسونيان للفيزياء الفلكية، الذى تابع مع زميله ديڤيد سپرجل (David Spergel)، فى منتصف الثمانينيات تداعيات تلك الأفكار. ولم يكن پرس ولا سپرجل قد قرأ فى عام ١٩٧٨ البحث الذى لخص فيه فولكنر وچيليلند حساباتهما، ولم يحدث أنهما حضرا أيًا من اللقاءات التى حاول فيها فولكنر إثارة الاهتمام فى ذلك الحين بالفكرة التى طرحها من قبل. لكنهما قاما بشكل مستقل، وبداية من الصفر، بتطوير حساباتهما الخاصة عن كيف يمكن لهذه الجسيمات ذات الكتلة الكبيرة، التى أطلقا عليها اسم «كوزميونات»، أن تؤثر على سلوك الكون بشكل عام، وعلى المجرات والنجوم الفردية. كما اكتشفا أيضًا أن وجود مثل هذه الجسيمات داخل الشمس يمكن أن يحل مشكلة النيوترينو الشمسى.

الكوزميونات هى الويمپات

إن نموذجَى العمل متماثلان أساسًا، ولقد حان الوقت الآن للنظر إليهما تفصيلاً. إن فريق هارفارد تفادى خطأ وقع فيه فولكنر وزملاؤه، وذلك بمقاومة إغراء وقف نظريتهما على وجود نوع معين واحد من الجسيمات «الجديدة». إذا اعتمدت نظرية على وجود نيوترينات ذات كتلة كبيرة، فإنها ستبدو ساذَجة وسخيفة لو ثبت عدم وجود

هذه النيوترينات أصلاً، وهو ما أدركة شتيجمان. لكن مع حلول عام ١٩٨٥ كان منظِّرو الجسيمات يذكرون قدرًا وفيرًا من الجسيمات الجديدة التى تتفق مع مختلف الأفكار عن كيفية توحيد قوى الطبيعة فى نظرية كل شىء (TOE). والنقطة الضمنية فى كل ذلك هى أن «أيًا كانت» النظرية التى ستثبت فى النهاية أنها صحيحة، فسيكون هناك مكان لشكل «ما» من أشكال الجسيم ذى الكتلة الإضافية الكبيرة. وبالتالى لا تحدد أى جسيم هو الذى تشير إليه فى حساباتك الفلكية. أعطه فقط اسمًا يصلح لأى شىء، مثل كوزميون.

للأسف، كوزميون ليس بالاسم المناسب، لأنه لا يوضح الصلة مع التطورات فى نظرية فيزياء الجسيمات. فى الحقيقة، لقد «حددت» المشاهدات الفلكية نوع الجسيم الذى يتعين أن يوجد هناك لملء دور الكتلة المفقودة، وهو ما يخبر منظرى فيزياء الجسيمات بما يجب أن يبحثوا عنه فى حساباتهم (لقد حددت دراسات الشمس، كما سنرى، كتلة الجسيم). إن المصطلح الذى يفضله أغلب المنظرين حاليًا هو كلمة مكونة من أوائل حروف أهم الصفات التى يجب أن يتصف بها أى كوزميون مفترض. يجب أن يكون هذا الجسيم ذا تفاعل ضعيف، بمعنى أنه لا «يشعر» بالقوة النووية القوية، وإلا فإن التفاعلات النووية ستدمره. كما يجب أن تكون له كتلة، لكى يولِّد قوة جاذبية ويلعب دور المادة المعتمة فى المجرات، ومن ثَم فلقد سُمى «الجسيم ذو الكتلة الكبيرة والتفاعل الضعيف» أو WIMP.

من أين أتى الـ «ويمپ»؟ هناك عدة احتمالات تفصيلية، ولا يمكن أن تكون كلها صحيحة. لكننى أفضل شخصيًا الفكرة القائلة بأن وجود الويمپ فى الكون يرتبط ارتباطًا وثيقًا بوجود المادة العادية التى نتكون منها، أى البروتونات والنيوترونات (المعروفة باسم جامع هو الباريونات)، ويمكننا إخراج الإلكترونات من المناقشة حاليًا، نظرًا لأن كتلتها صغيرة جدًا مقارنة بالبروتونات والنيوترونات والويمپ. ويمكن فهم ذلك فى أفضل صورة بالشكل الذى عبر عنه لأول مرة فى الستينيات من القرن العشرين عالم الفيزياء السوفيتى أندريه ساخاروف.

كان السؤال المحير الذى طرحه ساخاروف، إذا كانت نظرية الانفجار العظيم صحيحة، فلماذا يُفترض أن توجد بالكون أية مادة على الإطلاق؟ ففى الانفجار العظيم ذاته، كانت الطاقة عند درجات الحرارة شديدة الارتفاع تتخذ شكل إشعاع. وعند مثل

رجات الحرارة العالية تلك، تستطيع الطاقة فى الإشعاع الكهرومغناطيسى (الفوتونات) أن تتحول مباشرة إلى أزواج من الجسيمات ـ إلكترون وبوزيترون، بروتون وبروتون مضاد، نيوترون ونيوترون مضاد. وقد أثبتت كل الاختبارات المعملية تقريبًا، أن هذا النوع من التبادل بين الطاقة والكتلة يخضع لقانون أساسى هو قانون التماثل، أى إنه يتم خلق الجسيمات والجسيمات المضادة معًا. لأن الباريون الذى يتقابل مع نظيره الباريون المضاد يَفْنَى فى نفخة طاقة بحيث لا يترك وراءه أى جسيم، ومعنى ذلك أن تكوين أزواج الجسيمات والجسيمات المضادة، فى الواقع، لا يضيف إلى عدد الباريونات فى الكون. فإذا كان كل باريون يساوى (+١) وكل باريون مضاد يساوى (−١)، فإن كل زوج من جسيم وجسيم مضاد يضيف صفرًا بالضبط لعدد الباريونات فى الكون.

إذا كان هذا القانون الطبيعى قد سرى على الانفجار العظيم ذاته، فإنه فى مرحلة تالية، بعد أن برد الكون عن بدايته الساخنة، سيلتقى كل باريون، عاجلاً أو آجلاً مع نظيره الباريون المضاد ويلغيه. وبعد ١٥ مليار عام كنا سنجد كونًا زاخرًا بالطاقة ولكنه خالٍ تمامًا من المادة.

لقد أشار ساخاروف إلى أنه يتعين أن تكون هناك عمليات فعالة فى فترات مبكرة جدًا من تاريخ الكون عملت بشكل انتقائى على إنتاج فائض من الباريونات يفوق عدد الباريونات المضادة عندما خُلقت المادة من الطاقة. لقد كانت مقولة ساخاروف مثل العديد من التنبؤات العبقرية الفذة التى تبدو بدهية ـ بمجرد أن يقولها أحدهم أمامك (ولقد جعلت الأمر يبدو أبسط بكثير، بالطبع، بأن تجاوزت عن ذكر كافة الرياضيات المتصلة بهذا التبصر البارع والدقيق والتى وضعته على قاعدة علمية أكيدة). إن علماء الفلك يعرفون بالفعل كم الإشعاع الكبير الموجود فى الكون حاليًا. إذ يمكنهم رصد والتقاط أضعف هسيس للموجات اللاسلكية يأتى من كل الاتجاهات فى الفضاء، ويُعرف بالخلفية الإشعاعية الكونية. هذا الإشعاع هو ما تبقَّى من كرة نار الانفجار العظيم بعد أن بردت لمدة ١٥ مليار عام. إن هذا الإشعاع يملأ كل الكون، وتبلغ درجة حرارته حاليًا أقل قليلاً من ٣ كلفن (أى أقل من ـ٢٧٠°م)، وهو ما يكافئ وجود ٤٨٨ فوتونًا فقط فى كل سم^{3} من الفضاء فى كل مكان فى الكون. وإذا كانت كل المادة فى كل النجوم المضيئة والمجرات (كل المادة الباريونية) موزعة بشكل متماثل عبر الكون، فمعنى ذلك أن كل عشرة ملايين سم^{3} تحتوى جسيمًا واحدًا فقط. بطريقة أخرى، فإن لكل بروتون أو نيوترون فى الكون يوجد مليار، $(١٠)^{٩}$ فوتون تقريبًا.

هذه النسبة(١٠)^٩: ١، هى مقياس لصغر حجم الخلل فى القانون القائل بأن الجسيمات والجسيمات المضادة تتكون دائمًا فى شكل أزواج - ومما يثير الدهشة أنه لم يتم أبدًا قياس ذلك بشكل مباشر فى ظل الظروف المعملية! إن هذه النسبة تقول لنا إن لكل مليار باريون مضاد نتج فى الانفجار العظيم هناك مليار باريون زائد باريون واحد. وفى كل حالة، يلغى مليار من الأزواج بعضها البعض لإنتاج مليار فوتون، ويتبقى باريون واحد.

ولا يزال علماء الفيزياء يصارعون من أجل وضع نظرية موحدة ستحقق التوازن الصحيح تمامًا بين الباريونات والفوتونات الناجمة من التفاعلات التى حدثت فى الانفجار العظيم. هناك عدد من المتنافسين على مثل هذه النظرية، لكن أحدًا منهم لم يحدد الإجابة «الصحيحة» بدقة. غير أن ذلك ليس هو المهم هنا. النقطة المهمة هى أن القياسات التى قام بها علماء الفلك تنطق بالإجابة الصحيحة، وهى أن هناك مليار فوتون لكل باريون. وإذا كانت توجد أيضًا مادة معتمة فى الكون - كما يجب أن يكون ذلك، وإذا أُخذت القيمة الظاهرية لعمليات رصد حركات النجوم والمجرات - فعندئذ يكون افتراض أن المادة المعتمة (الويمپ) قد تكونت بالطريقة نفسها تقريبًا، هو الافتراض الأبسط والأكثر طبيعية. وإلى أن يظهر سبب قوى للتخلى عن تلك البساطة واللجوء إلى نظرية أكثر تعقيدًا تصف كيفية وصول الأشياء إلى ماهيتها حاليًا، علينا أن نخمن أن لكل مليار ويمپ مضاد تكون فى الانفجار العظيم هناك مليار ويمپ زائد ويمپ واحد، وبالتالى فإن الفائض المتبقى حتى يومنا هو ويمپ واحد لكل مليار فوتون، أو ويمپ واحد لكل باريون. وإذا كان ذلك صحيحًا، فإن مجموع الويمپات التى تتراوح كتلة الواحد منه بين خمسة وعشرة أضعاف كتلة البروتون يمكن أن يوفر تمامًا كمية المادة المعتمة التى تحتاج إليها مجرتنا. وأحد تداعيات ذلك هو أن النجوم المضيئة - المادة الباريونية - تمثل ١٠٪ من كتلة الكون، وأن ٩٠٪ من كتلة الكون هى فى شكل ويمپات بالفعل. قد يصعب على البشر الذين يتكونون من باريونات (وإلكترونات)، ويعيشون على كوكب باريونى يدور حول نجم باريونى، تقبُّل ذلك. إلا أن الأمر حقيقى رغم كل شىء. فهناك كَمٌّ ضخم من الأدلة على أن ما نراه فعلاً هو واحد على عشرة فقط من الكون، وأن الباقى مختفٍ عن نظرنا المتفحص.

روابط كونية

بصرف النظر عن حقيقة أن الطريقة التى تتحرك بها النجوم والمجرات تدل على أنها مشدودة بقوة جاذبية كمية كبيرة من المادة المعتمة، فإن جيلاً كاملاً من علماء الكونيات تملّكتهم الحيرة حول الكيفية التى وُجدت بها المجرات أصلاً. إن المجرة النموذجية لها كتلة تكافئ مائة مليار شمس، ومثل هذه المجرات هى السمات الأساسية لكوننا - ويُشار إليها أحيانًا بأنها «جُزُر فى الفضاء». إن الكون نفسه يتمدد، ونحن نعلم ذلك من قياسات الضوء القادم من المجرات البعيدة، والتى تبين إزاحة مستمرّة نحو النهاية الحمراء للطيف. ويتم تفسير هذه الإزاحة نحو الطيف الأحمر إذا كانت كل المجرات تتحرك بعيداً عن بعضها البعض - وهو تأثير ضوئى يكافئ التأثير الصوتى الذى يجعل صوت صفارة إنذار سيارة الشرطة أكثر خفوتًا إذا كانت السيارة تنطلق بعيدًا عنك. ومع ذلك، فإن الزحزحة نحو اللون الأحمر من الطيف لا يعنى أن المجرات تتحرك عبر الفضاء كما تتحرك الأرض عبر الفضاء وهى تدور حول الشمس، أو كما تتحرك الشمس عبر الفضاء وهى تدور حول مركز مجرتنا، مجرة درب اللبانة. وإنما يُفسر ذلك بأن الفضاء ذاته يتمدد - وهو ما تنبأت به فعلاً نظرية النسبية العامة لآينشتاين، قبل رصد الزحزحة نحو اللون الأحمر من الطيف.

كان الكون، فى الانفجار العظيم، من زمن بعيد، عبارة عن كرة نار ساخنة وكثيفة، وحركة فوضوية عنيفة. وعندما تمدد هذا الكون أصبح أقل كثافة وأكثر برودة حتى وصلت درجة حرارته إلى ٣ كلفن، وبلغت كثافته جسيمًا واحدًا لكل عشرة ملايين سم^{٣} من الفضاء. ولكن كيف يمكن لسُحُب من الغاز تحتوى على مادة تساوى من الناحية الكمية مائة مليار شمس أن تتكثف من الكون المتمدد، بينما يحاول تمدد الفضاء أن ينشر الغاز ليصبح أقل كثافة، ويمزق السحب قبل أن تتمكن من الانهيار؟

وفى الثمانينيات من القرن العشرين، أدرك علماء الكونيات الإجابة عن هذا السؤال، وهى أن ذلك لا يمكن أن يحدث دون تدخل. إن قوة جاذبية كل النجوم المضيئة فى أية مجرة، أو حتى فى جماعة من المجرات، لا تكفى لتفسير كيف تماسكت سحابة الغاز الأصلية فى المراحل الأولى من الكون المتمدد. لكن محاكاة الكمبيوتر لطريقة انهيار سحب الغاز عند تمدد الكون تبين أن الحيلة «يمكن» أن تنجح، شريطة أن يكون هناك عشرة أضعاف كمية المادة المعتمة تنتشر فى هالة ممتدة حول كل مجرة. وإن الويمپ من

النوع الذى سبق وصفه فى القسم السابق هو ضالتنا المنشودة لتحقيق التوازن فى المعادلة، ولتوفير قوة الجاذبية الإضافية التى كانت تحتاجها المجرات الأوَّلية لكى تتماسك معًا فى الكون المتمدد(*).

لكن الويمپات لا تشكل سُحُبًا تنهار لتكون نجومًا. إن المادة الباريونية فقط هى التى تقوم بهذا العمل. وذلك لأن الويمپات لا تحمل شحنة كهربية، وبالتالى لا يمكنها إشعاع طاقة فى الفضاء. وعندما تنكمش سحابة من الجسيمات تحت تأثير قوة الجاذبية، فإنها تصبح أكثر سخونة لأن طاقة الجاذبية تتحرر - وتتحرك الجسيمات بسرعة أكبر ويزيد الضغط داخل السحابة وتقاوم أى انهيار بعد ذلك. وتنطبق هذه القاعدة على سحابة من الويمپات أكبر من مجرتنا، كما تنطبق على الشمس نفسها. وإذا كانت السحابة تتكون من باريونات، فإن الحرارة تتحول إلى إشعاع كهرومغناطيسى بواسطة الجسيمات المشحونة، ويهرب هذا الإشعاع خارج السحابة. وبالتالى يخف الضغط، وتواصل السحابة الانكماش وتصبح أكثر سخونة فى الداخل إلى أن يبدأ الاحتراق النووى ويؤمِّن الضغط الإضافى المطلوب لوقف الانهيار (وكما يحب چون فولكنر أن يقول، إن التفاعلات النووية، بهذا الشكل، هى التى تحفظ النجوم «باردة»، وذلك بحمايتها من مزيد من الانهيار مع الاحتفاظ بداخلها أكثر سخونة!). لكن إذا لم تكن هناك وسيلة لتحرير الطاقة من داخل السحابة فى شكل إشعاع، فإن السحابة تتوازن عندئذ وتثبت عند حجم مناسب. والحجم المناسب بالنسبة للويمپات التى تخلفت من الانفجار العظيم، كبير جدًا. إن الويمپات منتشرة عبر هالة شبه كروية حول مجرتنا، عازفة عن التفاعل مع الباريونات أو مع بعضها البعض إلا عبر قوة الجاذبية. غير أن نجمًا مثل شمسنا يمخر عباب بحر من الويمپات، لا بد أن يتجمع داخله عدد متواضع نسبيًا من هذه الجسيمات، تم التقاطه والإمساك به هناك بواسطة قوة جاذبية الشمس ذاتها. وقد أوضح ذلك فريقان من الباحثين، على طرفَى القارة الأمريكية، هما: فريق سانتاكروز وباحثو هارفارد، اللذان قاما، كل على حدة وبشكل مستقل تمامًا، بشرح سبب برودة قلب الشمس عما يُفترض أن يكون وكيفية حدوث ذلك.

(*) مما يؤدى إلى البلبلة، أن الباحثين الذين استخدموا الكمبيوتر فى عمليات المحاكاة لتكوُّن المجرات يشيرون إلى المادة المعتمة بتعبير «مادة معتمة باردة» (CDM). إن الكوزميون و (CDM) والويمپ هى الشىء نفسه، وإن اختلفت الأسماء الثلاثة. وسوف ألتزم فى هذا الكتاب بتعبير ويمپ.

الاحتفاظ بالشمس باردة

يتوقف كل شيء على كمية الويمپات التى التقطتها الشمس خلال حياتها، وعلى المكان المحدد الذى تكمن فيه داخل الشمس. ولحسن الحظ، أن هذه السمات يسهل حسابها. يستطيع الويمپ الواحد أن يمر رأسًا عبر الشمس بدون أن يصطدم بأكثر من بروتون واحد (أو أية نواة أخرى) - فالويمپات عازفة عن التفاعل مع المادة العادية مثل عزوف النيوترينات تقريبًا. وبالتالى، فإن الشىء الوحيد المهم فى الحقيقة هو قوة الجاذبية، طالما أن ما يهمنا هنا هو اصطياد الويمپات داخل الشمس. ويتعين على أى جسيم أن يتحرك على سطح الشمس بسرعة ٦١٧كم/ث ليتمكن من الهروب من قوة جاذبية الشمس - وهى «سرعة الهروب»، إذ سيتم أَسْر أى جسيم يتحرك بسرعة أقل منها. أما داخل الشمس، فتصل سرعة الهروب إلى ٢١٠٠كم/ث وذلك فى المسافة التى يقع فيها نصف كتلة الشمس بين جسيم ما والمركز. غير أن هذه المسافة تمثل أكثر بكثير من نصف المسافة بين السطح والمركز - لنتذكر أن ٤٠٪ من كتلة الشمس تتركز فى قلب لا يشغل سوى ٢٥٪ من نصف قطرها. لكن فى القلب ذاته، يجب على أى جسيم أن يتحرك بسرعة ٣ آلاف كم/ث، وأن يكون محظوظًا بدرجة كافية لكى يتفادى التصادم مع بروتون أو أية نواة أخرى وهو فى طريقه إلى الخارج، لكى يتمكن من الهروب تمامًا إلى الفضاء.

إن كل ويمپ فى هالة الجسيمات التى تحيط بمجرتنا يتحرك فى مداره الخاص، ويبقى فى مكانه بفعل قوة الجاذبية. إن السرعة المطلوبة للبقاء فى مدار معين واحدة أيًا كانت كتلة الجسيم. وعند المسافة التى تفصل الشمس عن مركز المجرة تبلغ السرعة المدارية المناسبة حوالى ٣٠٠ كم/ث، سواء أكان الجسم الذى يدور فى هذا المدار نجمًا أم ويمپا أم كوكبًا افتراضيًا معتمًا. ومن ثَم، فمن السهل إدراك أن أغلب الويمپات التى تحصدها الشمس أثناء مرورها عبر الفضاء سوف «تلتصق» بها بالفعل. وإذا لحقت الشمس بالويمپ فلا يوجد أبدًا أى فرق فى السرعة، وحتى إذا كان الويمپ يتحرك فى الاتجاه المعاكس للشمس، فإن سرعته النسبية فى التصادم الأمامى تكون ٦٠٠ كم/ث فقط، وهى سرعة لا تكفى للهروب ولا حتى من سطح الشمس. وتأخذ الحسابات الدقيقة فى الاعتبار طريقة استقطاب الجسيمات بواسطة مجال قوة الجاذبية الخاصة بالشمس، كما تُدْخِل فى حسابها التوزيع المطلوب للويمپات عبر الهالة من أجل تأمين

«الكتلة المفقودة»، وتعطى هذه الحسابات الدقيقة إجمالى سكان الشمس من الويمپات فى الوقت الراهن، آخذة فى اعتبارها الأربعة مليارات ونصف المليار من الأعوام التى قضتها الشمس تُبْحر عبر الهالة إلى يومنا هذا. إن تركيز الويمپات المطلوب لتوفير الكتلة المفقودة فى مجرتنا، مثلاً، يكافئ الكتلة الشمسية من المادة المنثورة عبر كل ألف سنة ضوئية مكعبة من الفضاء. وعند وضع تلك الأرقام فى الحسبة، ومعها الأرقام الأخرى الوثيقة الصلة بالموضوع، تتضح ضرورة أن يكون هناك ويمپ واحد داخل الشمس لكل مائة مليار بروتون، علمًا بأن كل ويمپ له كتلة تتراوح ما بين خمسة إلى عشرة أضعاف كتلة البروتون.

إنها نسبة صغيرة. إن نسبة الويمپات للبروتونات داخل الشمس «أقل» مائة مرة عن نسبة الباريونات إلى الفوتونات فى الكون ككل ـ والذى بدا كرقم صغير عند تعرفنا عليه أول مرة. هل يمكن لمثل هذا الجزء اليسير من الويمپات أن يؤثر فعلاً فى طريقة عمل الشمس؟ والمدهش أن الإجابة عن هذا السؤال هى «نعم».

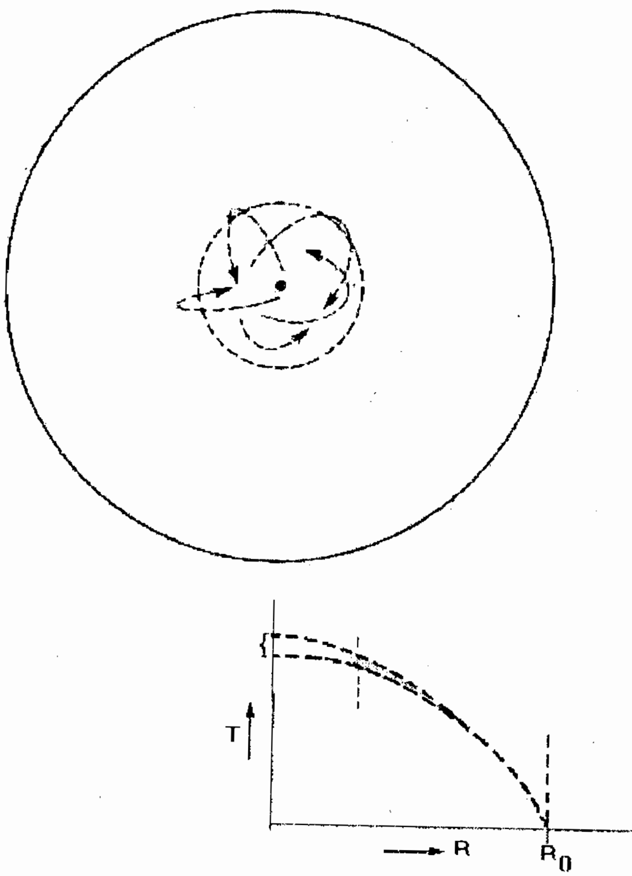
إن الويمپات ذات الكتلة التى تتراوح بين خمسة وعشرة أضعاف كتلة البروتون، سوف تستقر داخل الشمس فى مدارات مستقرة تنتشر على امتداد ١٠٪ فقط من نصف قطر الشمس. وتكوِّن هذه المدارات قلبًا رقيقًا من الويمپات، يتحرك عبر الجزء الأكثر كثافة من الشمس، وكأن الباريونات ليست موجودة تقريبًا. لكن كلمة «تقريبًا» هى مفتاح الطريقة التى تبرد بها الويمپات قلب الشمس. إن النيوترينات التى رصدها داڤيز وزملاؤه إنما تنتج من تفاعلات نووية تحدث فى أكثر أجزاء الشمس سخونة، وهو الجزء الأعمق من نصف قطر الشمس والذى يُقدر بـ٥٪ منه. غير أن بعض التفاعلات النووية تستمر فى الحدوث خارج هذا القلب الداخلى مباشرة، حيث درجة الحرارة أقل قليلاً. ورغم أن درجة الحرارة تكون أقل فى ذلك الجزء الخارجى للقلب، بحيث يتم الاندماج النووى بقوة أقل، فإن حجم هذا الجزء يكون أكبر (الذى يعتمد بالطبع على «مكعب» نصف القطر). وبالتالى، فإن أغلب الطاقة الناتجة عن التفاعلات النووية داخل الشمس تأتى بالفعل من المنطقة الواقعة خارج الـ ٥٪ التى تمثل الجزء الأعمق من قلب الشمس، وتمتد هذه المنطقة إلى حوالى ١٢٪ من نصف قطر الشمس. وتتجمع فى هذه المنطقة بالذات الويمپات ذات الكتل الواقعة فى المدى المَعْنىّ. وتختلف الويمپات التى تدور فى مدارات، داخل الشمس عن الجسيمات فى المدارات المحضة، والتى لا تتأثر إلا بقوة الجاذبية، فالويمپات الشمسية تتأثر أيضًا بالتصادمات العارضة مع البروتونات والأنوية

الأخرى. ومن ثَم تتوقف المنطقة التى تستقر فيها على كتلتها. إن الويمبات الأخف كتلة تكتسب طاقة من التصادمات مع البروتونات وتهرب من الشمس، فى حين أن الويمبات ذات الكتلة الأكبر تخسر طاقة نتيجة تلك التصادمات وتغوص داخل الجزء الأعمق من قلب الشمس، وبالتالى لن تتمكن قط من التأثير على المنطقة المهمة المحصورة بين ٥٪ و١٠٪ من نصف قطر الشمس فى الاتجاه من الداخل إلى الخارج. لكن إذا كانت كتل الويمبات فى المدى المطلوب لتأمين المادة المعتمة فى الكون، فإن مداراتها ستأخذها عبر الـ١٠٪ من الجزء الداخلى لقلب الشمس.

وفى كل مدار يتعرض كل ويمب لتصادم واحد، فى المتوسط، مع بروتون. وإذا حدث هذا التصادم فى الجرء الأكثر عمقًا من قلب الشمس (أى الـ٥٪ الداخلية من نصف قطر الشمس)، فإن الويمب سيكسب طاقة تجعله يتحرك بسرعة أكبر ـ ويصبح أكثر سخونة. وفى الوقت نفسه، يفقد البروتون الذى صدمه الويمب طاقة ويتحرك بسرعة أقل ـ ويصبح أقل حرارة. لكن عندما يصطدم ويمب سريع الحركة مع بروتون يتحرك بسرعة أبطأ خارج المركز بمسافة بسيطة، فإنه يفقد بعض طاقته. وعندئذ تبطئ سرعة الويمب ويفقد قدرًا من حرارته، بينما تزيد سرعة البروتون وتصبح درجة حرارته أعلى. إن الويمبات بتحركها السريع حول الـ١٠٪ الأكثر قربًا من مركز الشمس، وباصطدامها العَرَضىّ مع البروتونات وأنوية أخرى، تقوم بتعديل ظروف درجة الحرارة عبر الـ١٠٪ الأكثر قربًا من مركز الشمس؛ مما يجعل ذروة درجة الحرارة فى المركز أقل مما يجب أن تكون عليه طبقًا للنموذج القياسى. إن الويمبات تجعل الجزء الأقرب لمركز الشمس والذى يمثل ٥٪ أقل حرارة بعض الشىء، فى حين تجعل الـ٥٪ التالية أعلى حرارة قليلاً، والتأثير الكلى لذلك هو أن كمية الطاقة النووية المنتجة هى نفسها بالضبط، غير أنه يتم إنتاجها من قلب أكبر حجمًا وساخن بدرجة أكثر توازنًا عن النموذج القياسى.

إن الويمبات تستطيع أن تفعل ذلك، بالرغم من ندرتها، نتيجة للسرعة التى تنقل بها الطاقة. ولنتذكر أن الفوتون الذى يتصادم مع مليارات البروتونات فى مساره العشوائى الشديد الاهتياج وهو فى طريقه خارج قلب الشمس، سيستغرق مئات آلاف السنوات لعبور الجزء الداخلى من نصف قطر الشمس والذى يُقدر بـ١٠٪ من نصف قطرها. لكن الويمب يعبر هذه المسافة فى حوالى ١٧ دقيقة. إن كل ويمب يقوم بهذه الرحلة الانكفائية (أى التى تبدأ من نقطة انطلاق معينة وتنتهى عند النقطة نفسها عبر الطريق نفسه عادة) عبر الجزء الداخلى من نصف قطر الشمس، الذى يُقدر بـ١٠٪

مرتين تقريبًا كل ساعة، أى ٤٨ مرة فى اليوم الواحد، أى ما يقرب من ١٨ ألف مرة سنويًا على امتداد كل مليارات الأعوام التى كانت فيها الشمس تلمع وتضىء. ويحمل الويمپ فى كل مرة حصته من الطاقة إلى الخارج. إن النسبة بين الزمن الذى يستغرقه الويمپ لعبور الـ١٠٪ الداخلية من نصف قطر الشمس والزمن الذى يستغرقه الفوتون للقيام بالرحلة نفسها هى مائة مليار إلى واحد - وهى النسبة نفسها بين عدد الباريونات إلى عدد الويمپات. وتعوض الويمپات بفاعليتها فى تحريك طاقة إلى الخارج عبر المنطقة الحرجة ندرتها داخل الشمس (شكل ١- ٥).



(شكل ١ – ٥): تقوم الويمپات التى تدور فى أكثر الأجزاء قربًا من باطن الشمس والتى تمثل ١٠٪ من نصف قطرها بنقل الحرارة إلى الخارج؛ مما يجعل درجة حرارة قلب الشمس تنخفض بمعدل ١٠٪ . ويوضح ذلك الرسم البيانى لدرجة الحرارة فى الجزء المشار إليه بالقوس ({) وهذا الرسم التبسيطى لا يوضح كيف أن الحرارة المعاد توزيعها تدفئ بالفعل المنطقة التى تقع مباشرة خارج قلب الشمس، بحيث تبقى الطاقة الكلية المنتجة ثابتة. إن الظروف على سطح الشمس (Ro) لا تتأثر بوجود الويمپات. والنقطة الرئيسة هى أن انخفاض الحرارة المركزية يفسر بالضبط ندرة النيوترينات التى رصدها راى داڤيز وزملاؤه. (يعتمد هذا الشكل على أرقام قدمها چون فولكنر).

ولقد أوضحت النماذج القياسية للشمس التى وضعها الكمبيوتر بعد إضافة تأثيرات الويمپات إليها، إن درجة حرارة الجزء الداخلى من قلب الشمس، حيث يتم إنتاج نيوترينات داڤيز، تنخفض بشكل تلقائى بنسبة الـ١٠٪ المطلوبة بحيث تتلاءم قياسات النيوترينو مع النظريات، شريطة أن تكون كتلة الويمپات محصورة بين خمسة وعشرة أضعاف كتلة البروتون وأن تكون النسبة بين الويمپات والبروتونات هى ثلاثة ويمپات لكل مائة مليار بروتون ـ وفى حدود دقة كل هذه الحسابات، فإنها الخواص نفسها المطلوبة للويمپات لكى توفر المادة المعتمة فى مجرتنا، ولكى تساعد على تكوين المجرات فى المقام الأول.

إن تأثير هذا الانخفاض فى درجة حرارة التفاعلات النووية يؤدى إلى خفض عدد النيوترينات التى يمكن رصدها بتجربة داڤيز بمُعامِل اثنين أو ثلاثة؛ مما يجعل النظرية تتطابق بشكل جميل مع المشاهدات.

وعندما تقوم الويمپات بخفض درجة حرارة القلب الداخلى للشمس، فإنها تخفض بالضرورة أيضًا ضغط الإشعاع هناك، ويعنى ذلك أن كثافة المادة يجب أن تزيد قليلاً عنها فى النموذج القياسى، بحيث يسهم ضغط الغاز بنصيب أكبر فى تماسك الشمس ضد قوة الجاذبية. غير أن ذلك لا يمثل مشكلة، بل قد يكون ميزة كما سنرى فى الفصل السابع.

رد الفضل إلى أصحابه

لقد ظهر كل ذلك فى فورة من الأبحاث العلمية نُشرت فى عامَىْ ١٩٨٥ و ١٩٨٦، وتقاسم الفضل فيها بالتساوى أخيرًا فولكنر وچيليلند وپرس وسپرجل. لكن الطريق إلى ذلك لم يخلُ من إثارة. ليس من الصعب تصور مدى الرعب الذى شعر به فولكنر، فى بداية عام ١٩٨٥، عندما وصلت إلى سانتاكروز نسخة «ما قبل الطبع» لأول بحث عن الكوزميونات لپرس وسپرجل. وبإحساس بالهزيمة، أدرك فولكنر أن البحث قدم نفس الحل الذى اكتشفه هو وچيليلند قبل ذلك بسبع سنوات لمشكلة النيوترينو الشمسى، ولكنهما لم ينشراه قط. أما بحث پرس وسپرجل، فلقد أُعد فعلاً للنشر فى أكثر المجلات العلمية احترامًا والتى يقرؤها علماء الفلك، وهى مجلة الفيزياء الفلكية (Astrophysical Journal). وكان الوقت الذى مر طويلاً بحيث لم يتمكن فولكنر من أن

يتذكر كَمَّ التفاصيل التى تم نشرها من بحثه المشترك مع چيليلند فى عام ١٩٧٨، ضمن البحث الذى قاما بإعداده مع شتيجمان والآخرين. لكنه كان يعلم جيدًا أن فى العلم يرجع فضل الفكرة الجديدة إلى الشخص الذى «نشرها» أولاً، سواء أكان هناك شخص آخر فكر فيها قبله أم لا.

وبحث فى مكتبه عن نسخة من مقال ١٩٧٨، ولكنه اكتشف أنه تخلص منذ زمن طويل من كل النسخ. وعندئذ ذهب إلى مكتبة الكلية، فوجد أن مجلد المجلة الفلكية (Astronomical Journal) الذى يضم البحث المشترك معار خارجيًا. كما لم يتمكن من العثور على مُسوَّدة البحث الذى عمل فيه مع چيليلند فى عام ١٩٧٨ ولم يُنشر، بل إن چيليلند ذاته، بعد أن أنهى دراسات درجة الدكتوراه، ذهب منذ فترة طويلة إلى مرصد هاى التيتيود بمدينة بولدر بولاية كولورادو، حيث كان يتابع خط بحث مختلفًا تمامًا فى سلوك الشمس (المزيد عن ذلك الموضوع فى الفصل السادس). وقرر فولكنر، مكتئبًا، أن يتصل بپرس ويقارن معه مذكراتهما. ويتذكر فولكنر بعد ذلك رد فعل پيرس، ابتهاج شديد مفهوم من جانب پرس الذى قال: «حسن، إنه شىء سيئ جدًا يا چون»، واستطرد ضاحكًا وساخرًا: «أنت تدرك أن كل الفضل يذهب لمن كانت لديه شجاعة قناعاته ونشر [الفكرة] أولاً».

ولم يساعد ذلك فى تخفيف اكتئاب فولكنر. لكنه فى اليوم التالى وجد أن مجلد عام ١٩٧٨ من المجلة الفلكية قد أُعيد إلى المكتبة. وقلب الصفحات، فى عجلة من أمره، بحثًا عن المقال المطلوب، وفحص بدقة الجزء (جـ) من القسم الخامس. وكانت فرحته عظيمة عندما وجد، بالإضافة إلى الفكرة الأساسية المذكورة فى هذا المقال، تلخيصًا لأربع خلاصات أساسية من الخلاصات الخمس التى توصل إليها فى بحثه مع چيليلند. وكان ذلك كافيًا لإقامة أولوية علمية لا يطالها أى ظل شك. وبعد أن اطمأن، اتصل مرة أخرى بپرس ليخبره بالأنباء. ويقول فولكنر: «لقد لعننى بطريقة لطيفة، وهو مغتاظ»، لكن بعد انتهاء المزاح اتفق الفريقان سريعًا على توحيد القوى لإنتاج بحث نهائى يصف سيناريو الويمپ (WIMP).

ومع ذلك، فقد كان على فولكنر أن ينجز، أولاً، مهمة ممتعة. فلقد عثر، بعد تفتيش دقيق لمكتبه، على مسوَّدة عمرها سبعة أعوام ومغطاة تمامًا بالأتربة تتضمن البحث

الذى أعده بالاشتراك مع چيليلند. وكانت المسودة لا تحتاج إلا لتغييرات طفيفة لتكون جاهزة لإرسالها للنشر فى مجلة الفيزياء الفلكية ـ مراجعة المقدمة واعتراف بعمل سبرجل وپرس المستقل، وإضافة جزء جديد يشكر فيه «العديد من الزملاء الذين تناقَش معهم على امتداد السنوات، بما فى ذلك، بشكل خاص، جارى شتيجمان (الذى لولا نصيحته لكان هذا البحث قد نُشر قبل أوانه)». وبعد أن تم نشر البحث بشكل وافٍ قبل نهاية عام ١٩٨٥، أصبح فولكنر مستعدًا من جديد لأن يبدأ العمل فى تداعيات الويمپات على تطور النجوم.

وكان التعاون مع پرس وسبرجل (الذى تم نشره أيضًا فى مجلة الفيزياء الفلكية فى يوليو ١٩٨٦) تطورًا طبيعيًا لأعمال الفريقين السابقة، وليس مجرد إجراء دبلوماسى. استخدم فولكنر وچيليلند تقنيات تقريبية لتقدير الطريقة التى تتفاعل بها الويمپات مع الجسيمات الأخرى فى قلب الشمس، ولكنهما استخدما حسابات مفصلة للنموذج الشمسى لتحديد تداعيات ذلك فيما يتعلق بالناتج من النيوترينات الشمسية القابلة للرصد. وفى الجانب الآخر، قام پرس وسپرجل باستنباط خواص الويمپ بتفصيل كبير، مستخدمين التقدم الذى تَحقق فى نظرية الجسيمات الفيزيائية وفى الكوزمولوچيا فى غضون السنوات الأولى من الثمانينيات من القرن العشرين، ولكنهما لم يحققا تفاصيل التغيرات فى تركيب الشمس، وإنما أثبتا فقط أن الويمپات تستطيع فعلاً خفض درجة حرارة قلب الشمس. لقد تمكن الفريقان معًا من أن يقدما القصة كلها، كما عُرضت خطوطها العريضة فى القسم السابق.

لم يتمكن أحد بعد من «إثبات» أن الويمپ موجود فعلاً ـ إذ يتطلب ذلك التقاط واحد من الويمپات فى المعمل (وقد لا يكون ذلك مستحيلاً، انظر الفصل الثامن). لكن الدليل الظرفى على وجود الويمپ قاهر بالفعل . قال چون باكول عالم الفيزياء النظرية الذى قدم أكثر الدراسات اجتهادًا عن مشكلة النيوترينو الشمسى، والذى شارك فى البحث عن الكتلة المفقودة، معلقًا على الويمپات «إنها تحل مشكلتين أساسيتين ومثيرتين للسخط، إنها فكرة جميلة جدًا ويعنى إثبات عدم صحتها ضياع فرصة كبيرة». ومن ناحية أخرى، ألقى روجر تايلور (Roger Tayler)، من جامعة ساسكس، محاضرة رئيسة أمام الجامعة الفلكية الملكية بلندن، فى أواخر عام ١٩٨٨، قال فيها إنه بالرغم من «تعدد محاولات» حل مشكلة النيوترينو الشمسى، فإن «المحاولة الوحيدة التى تخضع

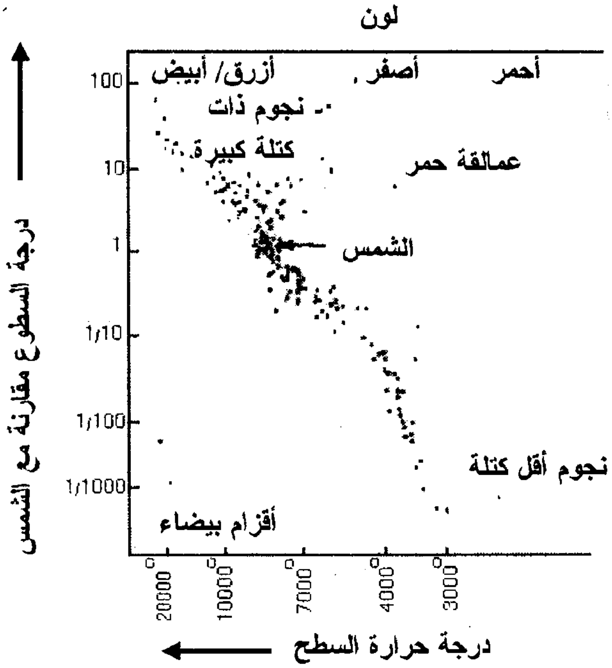
فى الوقت الراهن لدراسة عملية، هى تلك التى تتضمن وجود جسيمات ذات كتلة كبيرة وتفاعل ضعيف (الويمپات) فى الجزء الداخلى من الشمس» فعلى مدى عشر سنوات، تحولت نظرية الويمپ من كونها «مجرد فكرة غريبة أخرى» إلى النظرية «الوحيدة» الجديرة بالاحترام حاليًا والتى تقدم تفسيرًا لمشكلة النيوترينو الشمسى. وفى غضون ذلك، قام فولكنر بتطبيق هذه النظرية أيضًا لحل بعض المشكلات المعلقة منذ زمن فى النظرية الخاصة بالنجوم.

نجوم أخرى

إن الأداة الأكثر نفعًا لدى علماء الفلك لدراسة كيفية تغير النجوم عندما يتقدم بها العمر تُسمى رسم هرتز سبرونج ـ رسل التخطيطى، نسبة إلى عالمَى الفلك اللذين كانا رائدين فى استخدامه. ونظرًا لأن النجوم تعيش طويلاً جدًا، وتتغير ببطء شديد فليس هناك أمل فى دراسة تطوُّرها بمراقبة شيخوخة نجم أو اثنين. إلا أن رسم H- R التخطيطى يتيح لعلماء الفلك القيام بما يكافئ عمل عالم النبات الذى يدرس غابة من الأشجار تتضمن نباتات صغيرة وشجيرات وأنواعًا تامة النمو، ويستخدم هذه الدراسات لاستنباط دورة حياة شجرة.

إن رسم H-R التخطيطى هو نوع من الرسم البيانى، حيث تتم مقارنة درجة السطوع الكلى لنجم ما (والتى تُقاس عادة بوحدات، حيث درجة سطوع الشمس هى ١) مع درجة حرارة سطحه (والتى تكون مكافئة للونه، فالنجوم الزرقاء درجة حرارتها أعلى من النجوم الحمراء، وهكذا، بطريقة يمكن قياسها بدقة). إن أغلب النجوم تتبع القاعدة البسيطة تمامًا التى تنص على أن النجوم الأكثر سطوعًا تكون أكثر سخونة من النجوم الأقل سطوعًا، وهى تقع فى رسم H- R التخطيطى على نطاق ينتقل من أعلى اليسار (ساخن وساطع) إلى أدنى اليمين (بارد وباهت). إن الشمس نجم من السلسلة الرئيسة (شكل ٥ – ٢). لكن هناك استثناءات لهذه القاعدة. فبعض النجوم تكون ساطعة وباردة فى آنٍ واحد، بينما تكون نجوم أخرى ساخنة وباهتة فى ذات الوقت. من الممكن أن يكون نجم ساطعًا، وبالرغم من ذلك يكون سطحه باردًا (وبالتالى يبدو لونه أحمر). إذا كان ضخمًا جدًا. إن عدد الأمتار المربعة لسطح مثل هذا النجم ضخم ومن ثَم يطلق كمًا كبيرًا من الطاقة فيبدو ساطعًا، غير أن كمية الحرارة التى تعبر كل متر مربع من

السطح صغيرة وبالتالى يكون باردًا. مثل هذه النجوم هى العمالقة الحمراء، وتقع فى أعلى يمين رسم H - R التخطيطى. وبالمثل، يمكن لنجم باهت أن يكون ساخنًا إذا كان صغيرًا جدًا. فرغم تدفق كمية طاقة كبيرة من كل متر مربع من سطحه، مما يجعل ضوءه أبيض، فإن هذه الطاقة تتدفق عبر عدد صغير جدًا من الأمتار المربعة، وتُسمى مثل هذه النجوم الأقزام البيضاء، وتحتل أسفل يسار رسم H- R التخطيطى.

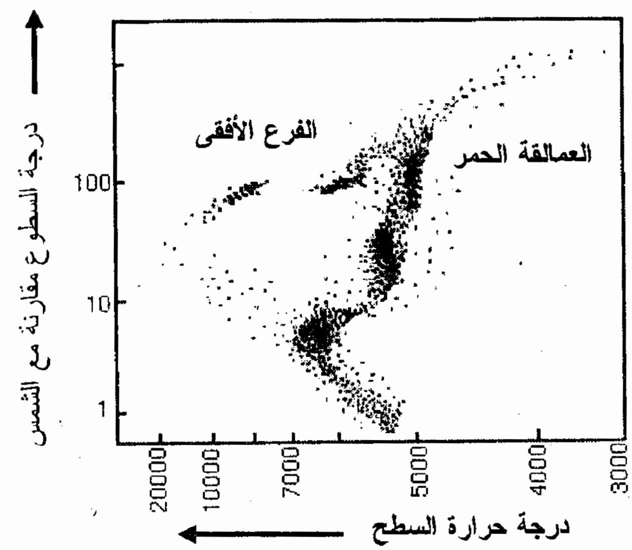


شكل (٢ـ ٥): يربط رسم H-R التخطيطى بين درجة سطوع النجم ودرجة حرارة سطحه، أو لونه. وتقع الشمس فى السلسلة الرئيسة فى نطاق يمتد من أعلى اليسار إلى أسفل اليمين فى الرسم التخطيطى.

وتتماثل السلسلة الرئيسة فى عملها مع نجوم مثل شمسنا، تحرق الهيدروچين فى قلبها وتحوله إلى هليوم. إن معدل حرق مثل هذه النجوم لوقودها النووى وبالتالى درجة سطوعها، يتوقف على كتلتها. فكلما زادت كتلة النجم احتاج إلى إنتاج مزيد من الطاقة فى قلبه كل ثانية لكى يتماسك فى مواجهة قوة شَد الجاذبية إلى الداخل. ومن ثَم تكون النجوم الساطعة الواقعة فى قمة السلسلة الرئيسة ساطعة لأنها أكبر حجمًا وكتلة، وتستخدم وقودها بسرعة أكبر من تلك التى فى قاع السلسلة.

ولقد تم تحديد كل ذلك بدرجة كبيرة بواسطة دراسة رسوم H- R التخطيطية لمجموعات مختلفة من النجوم. وبشكل خاص، هناك بعض مجموعات النجوم المعروفة

بالعناقيد أو المجموعات الكروية، التى يبدو أنها تكونت من انهيار سحابة غاز واحدة عندما كانت المجرة أصغر عمرًا. ويتعين بالتالى أن يكون لكل نجم فى مجموعة كروية ما نفس العمر. وعندما نظر علماء الفلك إلى رسم H- R التخطيطى لمثل هذا التجمع شكل (٣ ـ ٥)، وجدوا أن النجوم عند الطرف الساطع للسلسلة الرئيسة قد اختفت، وحلت محلها نجوم أبرد وعلى مسافة أبعد إلى يمين الرسم التخطيطى. كما يوجد عادة، ذيل من النجوم بين الموقع الذى كان «يجب» أن تكون فيه السلسلة الرئيسة العلوية و«فرع العملاق الأحمر الجديد»، وهذا الذيل هو الفرع الأفقى الذى أشرت إليه سابقًا.



شكل (٣ – ٥) فى رسم H - R التخطيطى لبعض تجمعات النجوم يكون الجزء العلوى من السلسلة الرئيسة مفقودًا، ويحل محله نجوم عملاقة حمراء. والنقطة التى تنثنى عندها السلسلة الرئيسة نحو اليمين، تشير إلى عمر تجمع النجوم.

لقد أعطت دراسات تفصيلية لعدة نجوم فى العديد من المجموعات الكروية، صورة واضحة لكيفية تطور نجم مثل شمسنا بعد مقارنتها بنماذج الكمبيوتر المستندة على الفيزياء القياسية (تدخل النجوم الضّخمة جدًا، بالطبع، فى انفجارات سوبرنوڤا، لكنها قصة أخرى لا أريد مناقشتها هنا). عندما يتوقف احتراق الهيدروچين عن الاستمرار فى قلب النجم، ينكمش الجزء المركزى للنجم المنتمى للسلسلة الرئيسة وترتفع درجة حرارته، بينما تتمدد طبقاته الخارجية. ويصبح النجم عملاقًا أحمر، ذا قلب خامل يتكون من الهليوم ويحيط به غلاف يستمر «احتراق» الهيدروچين فيه.

ويتحرك النجم إلى اليمين وإلى أعلى، بعيدًا عن السلسلة الرئيسة فى رسم H-R التخطيطى وبموازاة فرع العملاق الأحمر. وعند قمة فرع العملاق الأحمر، يصبح القلب ساخنًا جدًا إلى درجة تصلح لبدء الاحتراق النووى داخل القلب المكون من الهليوم. وهو ما يجعل القلب نفسه يتمدد، ويحرك بذلك غلاف الهيدروچين المحترق إلى منطقة أبرد فى النجم؛ الأمر الذى يؤدى إلى خفض شدة احتراق الهيدروچين. والتأثير المشترك لذلك هو إزاحة النجم، بشكل مفاجئ، إلى الفرع الأفقى، حيث يبقى هناك، بينما يستمر احتراق الهليوم فى قلبه واحتراق الهيدروچين فى غلاف خارج القلب. وعندما يتحول كل الهليوم فى القلب إلى كربون (وربما بعض الأكسچين أيضًا)، ينكمش الجزء الداخلى من النجم مرة أخرى، بينما تتمدد طبقاته الخارجية. ويتم احتراق الهليوم فى غلاف حول قلب الكربون، بينما تستمر عملية احتراق الهيدروچين ولكن فى غلاف أكثر بعدًا عن القلب. ويصبح النجم عملاقًا أحمر مرة أخرى، عند قمة نهاية فرع العملاق الأحمر «فرع العملاق المُقارِب». وبعد مرور النجم العملاق بسلسلة تطورات تشبه المغامرات؛ حيث يفقد جزءًا كبيرًا من كتلته، وينفجر فعلاً فى الفضاء، ينكمش ما تبقَّى على نفسه ويتحرك إلى أسفل فى جزء القَزَم الأبيض من رسم H-R التخطيطى.

والتوصل إلى ذلك كان ثمرة جهود بطولية بذلتها أجيال من علماء الفلك. هناك سمة أساسية واحدة لها أهمية خاصة بالنسبة للقصة التى يجب أن أقولها هنا. إن عددًا أكبر من النجوم الضخمة يقع قرب قمة السلسلة الرئيسة، وعدد أكبر أيضًا من النجوم الضخمة يجرى بسرعة أكبر عبر دورات حياته. وعندما تشيخ مجموعة من النجوم التى وُلدت معًا، فإن النقطة التى ينثنى عندها رسم H-R التخطيطى بالنسبة لهذه المجموعة بعيدًا عن السلسلة الرئيسة، تتحرك أسفل هذه السلسلة من أعلى اليسار إلى أسفل اليمين. ومن ثَم فإن النقطة التى تنثنى عندها السلسلة الرئيسة بعيدًا نحو فرع العملاق الأحمر تحدد لنا عمر هذه المجموعة من النجوم. إن رسوم H -R التخطيطية الخاصة بالتجمعات الكروية، مثل شكل (٣-٥)، توفر لنا أفضل قياس لعمر النجوم. وبالإضافة إلى ذلك، فقد ثبت أن التجمعات الكروية هى أقدم نجوم فى مجرتنا، وأنها تكونت عندما تفتقت المجرة ذاتها من سحابة ضخمة من الهيدروچين والهليوم، وأمسكت بها قوة جاذبية سحابة من الويمپات أكبر حجمًا وكتلة . لكن هناك

مشكلة، وهى أن أعمار أقدم النجوم فى المجرة، والتى تم استنتاجها من نقاط انحراف السلسلة الرئيسة، قريبة جداً، بشكل لا يبعث على الارتياح، من العمر الذى قدّره علماء الكونيات للكون ككل. ومن ثَم، يكون من الصعب بعد حدوث الانفجار العظيم، توافر أى وقت للويمپات لتقوم بجذب سحب الغاز معًا لتكوين مجرات بدائية، كما يصعب توافر أى وقت لبعض الغاز، فى إحدى هذه المجرات البدائية على الأقل، مجرتنا مثلاً، لتكوين النجوم الأولى. غير أن تأثير الويمپات «داخل» هذه النجوم، يؤدى إلى تخفيف الحرج الذى تسببه هذه المشكلة لعلماء الفلك.

روابط الويمپ

إن أعمار المجموعات الكروية، التى تحددت من خلال مقارنة نقاط انحراف السلسلة الرئيسة مع نماذج الكمبيوتر القياسية لكيفية عمل النجوم، تتراوح بين ١٣ مليار و ١٩ مليار عام. وذلك لا يعبر عن مدى الأعمار الحقيقية، نظرًا للاعتقاد بأن كل المجموعات الكروية قد تكونت معًا عندما وُلدت المجرة. إن هذا المدى الممتد هو بالأحرى مقياس لعدم اليقين المتبقى فى التقنية، مع اعتبار أن أفضل رهان لعمر أقدم النجوم فى مجرتنا هو ١٦ مليار عام. ولا يمكن قياس عمر الكون (الزمن الذى انقضى منذ الانفجار العظيم) بشكل مباشر، ويعتمد العمر المستنتج على نظريات تفصيلية لكيفية تطور الكون. ويتراوح عمر الكون، طبقًا لأفضل الأدلة، بين ١٥ مليار و ١٨ مليار عام، وربما كان أقرب إلى ١٥ مليار منه إلى ١٨ مليار . ويستحيل بالطبع أن يكون لديك نجوم عمرها ١٩ مليار عام فى كون عمره ١٥ مليار عام فقط (لو أخذنا التقديرين الأكثر تضاربًا)، وحتى القيمة المتوسطة لكل مدى والتى تعطى النجوم عمر ١٦ مليار عام فى كون عمره ١٦,٥ مليار عام تمثل إحراجًا لعلماء الفلك، الذين ليس بمقدورهم معرفة كيفية تكوُّن مجرات بعد الانفجار العظيم بـ٥٠٠ مليون عام فقط.

إن الويمپات تغير الصورة، لأنها تغير المعدل الذى تشيخ به النجوم مثل الشمس. والمثير للاهتمام، أن تأثير الويمپات غير ذى أهمية إلا بالنسبة لنجوم لها كتلة مثل كتلة شمسنا تقريبًا. إن النجوم الأكبر حجمًا وكتلة تلتقط كل عام عددًا من الويمپات يزيد عما تلتقطه شمسنا، لأن قوة جاذبيتها الأكثر قوة تجذب الجسيمات من مدى أوسع. لكن النجوم الأكثر ضخامة لا تعيش طويلاً بما يكفى بحيث تجمع عددًا كبيرًا من

الويمپات، بالرغم من أن قوة جاذبيتها الكبيرة تسمح لها بذلك. أما النجوم الأقل حجمًا من شمسنا فإنها، على النقيض، برغم توافر الوقت الكافى لديها لجمع الويمپات، فإنها تجمعها ببطء أكبر نتيجة لأن قوة جاذبيتها ضعيفة. وتراكم الويمپات فى قلوب النجوم ذات الكتلة الصغيرة يؤثر بفاعلية على سلوكها فى آخر الأمر ـ لكن عمر المجرة كبير بما يتيح الفرصة لتراكم كمية من الويمپات تكفى للقيام بذلك الآن.

ويمكن تحديد الكيفية التى يؤثر بها وجود الويمپات فى قلب النجوم على تطور نجم مثل الشمس، بإضافة تأثير الويمپات إلى تلك النماذج القياسية التى ينتجها الكمپيوتر والخاصة بتطور النجوم. وتبين الحسابات أن عمر النجم عندما يترك السلسلة الرئيسة يكون «أقل» من العمر الذى يترك عنده السلسلة الرئيسة نجم مماثل قلبه خالٍ من الويمپات . بمعنى آخر، إذا كان التجمع الكروى للنجوم يحتوى ويمپات، فيجب مراجعة كل الأعمار التى تم استنتاجها من خلال قياس نقاط الانحراف عن السلسلة الرئيسة فى رسم H - R التخطيطى، بحيث يتم تخفيضها. إن التأثير طفيف، لكن كما قال روجر تايلور فى محاضرته فإن «المشكلات المتصلة بأعمار تجمعات النجوم قد تصبح أيسر إذا كانت نجومها تحتوى على ويمپات». إن فولكنر مسرور بحذر (مجرد حذر فقط) من اكتشافه لكيفية عمل هذا التأثير. لقد أخبرنى أن أكبر تأثير يمكن إحداثه بنماذج واقعية للويمپ هو خفض الأعمار بنسبة ١٥٪ تقريبًا؛ مما يخفض العمر «القياسى» من ١٦ مليار عام إلى حوالى ١٣,٦ مليار عام. وأضاف، أن الويمپات يمكنها أن تحول الإحراج المتواضع إلى اتفاق متواضع. وبالطبع، إنها تسير فى الاتجاه الصحيح (حمدًا لله!).

إن ذلك يمثل النقطة المهمة بالطبع. فلو سببت الويمپات إحراجًا أكبر لكان ذلك بمثابة لطمة كبرى للنظرية، مع التلميح بقوة إلى أن مثل هذه الجسيمات قد لا يكون لها وجود إطلاقًا، وأن على علماء الفيزياء الفلكية أن يجدوا حلاً آخر لمشكلة النيوترينو الشمسى. ولقد طرح بعض علماء الفلك مثل هذا الاقتراح بالفعل، واستندوا فى حججهم على دراسة قاموا بها لنجوم الفرع الأفقى. لكن فولكنر الذى اكتسب مكانته كباحث باكتشافه كيفية عمل نجوم الفرع الأفقى، أجاب عليهم بعاصفة مضادة أثارت التشكك فى قيمة هذا النقد، حتى الآن على الأقل.

وتعتمد هذه المحاولة لضرب الويمپ على الطريقة التى تجعل وجوده فى قلب النجم سببًا لتلطيف الحرارة فى ذلك القلب (بحيث يصبح مُتَحارِرًا، أى متساوى الحرارة). ففى النماذج القياسية لنجوم الفرع الأفقى ـ وكان فولكنر رائدًا لهذا المجال فى الستينيات من القرن العشرين ـ يكوِّن قلب النجم، حيث يتحول الهليوم إلى كربون، منطقة حِمْل حرارى. إن درجة الحرارة فى قلب النجم تكون أعلى بكثير منها عند حافة منطقة احتراق الهليوم؛ مما يؤدى إلى دوران مادة القلب بواسطة الحمل الحرارى. وأحد الآثار التى تنجم عن ذلك هو سحب هليوم طازَج إلى مركز النجم من المنطقة التى تقع مباشرة خارج القلب، بالمعنى الضيق للكلمة، لتزود هذا الطور من حياته بوقود نووى إضافى. أما إذا كانت الويمپات موجودة وخفضت درجات الحرارة وصولاً إلى قلب مُتحارِر (متساوى الحرارة)، فسيتم إيقاف الحِمْل الحرارى. وفى هذه الحالة، سيحترق الهليوم الموجود فقط فى قلب المركز، ولن يأتى هليوم إضافى إلى قلب النجم بواسطة الحمل الحرارى. وينتج عن ذلك أن يكون هذا الطور من حياة النجم قصير الأجل، وبمجرد أن يحترق الجزء الداخلى من قلب النجم المتكون من الهليوم، ينتقل النجم سريعًا من الفرع الأفقى وبموازاة الفرع العملاق المقارب. إن التأثير الكلى لهذه العملية عند تطبيقها على أفراد تجمع كروى هو تقليل عدد نجوم الفرع الأفقى التى يمكن رؤيتها فى أى وقت، مقارنة مع عدد نجوم الفرع المقارب. غير أننا نرى بالفعل فى التجمعات الكروية نسبة من نجوم الفرع الأفقى أعلى مما يمكن تفسيره لو تم إيقاف الحمل الحرارى فى القلب.

وكان رد فولكنر على ذلك (والذى قدمه بالتعاون مع داڤيد سپرجل) إن إيقاف الحمل الحرارى فى القلب يؤدى بالفعل إلى خفض الزمن الذى تقضيه نجوم التجمع الكروى على الفرع الأفقى، غير أن الحمل الحرارى، فى الواقع، لا يتوقف. إن التغيرات التى تحدث داخل النجم أثناء تطوره، بعد أن يغادر السلسلة الرئيسة ويصعد إلى فرع العملاق الأحمر ثم يهبط بعد ذلك إلى الفرع الأفقى، تجعل من غير المحتمل أن تكون هناك أى ويمپات متخلفة فى القلب وقت بلوغ النجم الفرع الأفقى. وحتى لو تبقت أى ويمپات بعد انفجار الطاقة عند اشتعال القلب المتكون من الهليوم «وهج الهليوم» وتفادت أن يُعصَف بها فى الفضاء، فإن العديد من هذه الويمپات، فى ظل الظروف المتغيرة فى قلب النجم، سوف تتحرك بسرعة أكبر من سرعة الهروب المناسبة الجديدة. إن

الويمپات «ستتبخر» هاربة من القلب إلى خارج النجم حيث الفضاء - فى زمن يصل إلى مائة عام إذا كانت كتلتها حوالى خمسة أضعاف كتلة البروتون، وفى زمن أطول من ذلك إذا كانت كتلتها أكبر. أما الويمپات التى تتجاوز كتلتها ثمانية أضعاف كتلة البروتون، فبإمكانها البقاء فى قلب نجم الفرع الأفقى لفترة أطول بكثير - لكنها تتماسك معًا بإحكام بحيث لا تشغل سوى أعمق أجزاء القلب الداخلى للنجم، وتترك مجالاً واسعًا للحمل الحرارى لكى يحدث فى المنطقة التى تقع خارج نطاق تأثيرها مباشرة.

إن هذه الحجج عن تأثير الويمپات على نجوم الفرع الأفقى ظهرت على السطح فى عام ١٩٨٨ فقط، ومن المؤكد أن هناك المزيد من الأدلة والأدلة المضادة بين أنصار كل رأى فى الجدل الدائر بينما يجرى طبع هذا الكتاب، والذى سيستمر فى السنوات المقبلة. إن نقطة الخلاف دقيقة، وقد لا تُحل قط بما يرضى الجميع. لكن من المفيد الإشارة هنا إلى هذا الخلاف، بسبب الاقتراح القائل بأن كتل الويمپات يجب أن تقع عند النهاية الدنيا للمدى الذى افترضته الحسابات الأصلية. غير أن علماء الكونيات يفضلون أن تكون كتلة الويمپ حوالى عشرة أضعاف كتلة البروتون، حتى يمكنه توفير كل المادة المعتمة فى شكل واحد، لكن لا يوجد فى الواقع سبب يمنع أن تكون كتلة الويمپ نصف تلك الكتلة، بحيث تكون نصف المادة المعتمة فى شكل آخر. إن أجمل تنبؤ لنموذج الويمپ، والذى تدعمه حاليًا عمليات رصد للشمس ذاتها، يؤيد أيضًا أن تكون كتلة الويمپ عند النهاية الدنيا للمدى، أى حوالى خمسة أضعاف كتلة البروتون.

سنعرض للمزيد عن هذا الموضوع فى الفصل السابع. لكننى لا أريد لكم التسرع فى استنتاج أن الدراسات الوحيدة التى كشفت عن الجديد والمثير بالنسبة للشمس فى الثمانينيات من القرن العشرين، تدور كلها حول فكرة الويمپ فقط. فبينما كانت نظرية الويمپ تذبل تحت كومة من الأوراق فى مكتب فولكنر بسانتاكروز، وحتى بعد أن منحها سپرجل وپرس قبلة الحياة، كان هناك كَمٌّ ضخم من الأبحاث الأخرى تحاول أن تسبر أسرار الشمس. وأكثر هذه الأبحاث إثارة، كما سنرى فى الفصل السابع، ينتهى لأن يكون وثيق الصلة بقصة الويمپ (رغم أن السبب الأصلى لإجراء هذه الأبحاث ليس الويمپ)، وتشير هذه الأبحاث، بشكل غير مسبوق، إلى كيفية فهم أعماق الشمس على نحو أكثر تفصيلاً فى التسعينيات. ويتبقى قبل التحرك نحو نهاية قصة الدراسات الخاصة بالشمس حتى الوقت الراهن، أن نذكر شيئًا آخر لا يجوز إغفاله عن الطبقات الخارجية

لجارنا النجم، وكيف يمكن أن تؤثر التغيرات فى هذه الطبقات على حياتنا فى الأرض. لكن هناك أيضًا ارتباطًا مع قصة الويمپ الزاخرة بالأحداث ـ أو على الأقل مع أحد المشاركين فى تلك القصة. ولو كنتم تتساءلون عما كان رون چيليلند يفعله فى مرصده ببولدر طوال الفترة التى كانت نظرية الويمپ تذبل فيها، فقد حانت الفرصة لكم لتعرفوا الإجابة.

الفصل السادس

الشمس تتنفس

كانت الأبحاث التى قام بها چيليلند عندما ترك سانتاكروز تدور أيضًا حول الشمس - لكنه فى بدايات الثمانينيات من القرن العشرين كان أشد اهتمامًا بما يجرى فى الطبقات الخارجية للشمس، وليس بالأسرار المكنونة فى أعماقها. فبعد أن أكمل دراساته العليا فى كاليفورنيا ذهب چيليلند إلى بولدر بكولورادو، حيث أصبح (ولا يزال) عضوًا فى مرصد هاى التيتيود التابع للمركز القومى للأبحاث الجوية. وقد حدث ذلك فى عام ١٩٧٩، وكان چون إدى (John Eddy) أحد كبار العلماء فى المرصد، قد ادعى فى ذلك الوقت أن الشمس تتقلص بشكل يمكن قياسه بمعدل ١ و٠ ٪ كل قرن، وكان هذا الادعاء يتصدر الأنباء. إن مثل هذا التغير المثير فى قطر الشمس - وهو أسرع بكثير من أى شىء تصوره كلڤن أو هلمهولتز - قد يكون بالطبع، نوعًا من الظاهرة قصيرة الأجل فقط، عبارة عن تقلب استمر ربما لعدة مئات من الأعوام. إن الانكماش بمعدل مترين «كل ساعة»، كما زعم إدى، يعنى أن الشمس قد تتلاشى بالكامل فى أقل من مائة ألف عام. ولنطرح هذه الفرضية بشكل آخر كالتالى، لو أن الشمس انكمشت بذلك المعدل منذ عدة آلاف من الأعوام، لكانت الظروف على الأرض قد اختلفت اختلافًا جذريًا منذ عدة آلاف من السنوات. غير أن كل الأدلة الچيولوچية القديمة والمعتادة وتلك الخاصة بالنشوء والارتقاء تثبت ببساطة أن ذلك بعيد الاحتمال.

إذًا، ما الذى «كان» يجرى فى الشمس؛ وكان من الطبيعى أن يهتم چيليلند، الذى انضم فى ذلك الوقت الحافل بالإثارة إلى فريق علماء بولدر، بالقضية. وكان اهتمامه مفيدًا بالفعل، حيث أثبت أن تغير الشمس ليس كبيرًا بالدرجة التى اعتقدها إدى فى أول الأمر، وإن كان هذا التغير حقيقيًا وكبيرًا بما يكفى لتكون له تداعيات مهمة على الحياة فى الأرض. ولكن لوضع هذه الاكتشافات فى منظورها، يجب أن نعود مرة أخرى إلى اللغز الذى طرحه إدى عقب افتراض انكماش الشمس ـ وهو الحالة المحيرة لبقع الشمس (كَلَف الشمس) المفقودة.

انزعاج تثيره بقعة شمس أو اثنتان

عرف علماء الفلك، منذ عصر جاليليو فى أوائل القرن السابع عشر، أن بالشمس أوجه نقص، وأن بقعًا دَكْناء تمر أحيانًا عبر وجهها. وحتى قبل جاليليو، كان راصدو السماء الصينيون واليونانيون يعرفون بقع الشمس، لكن مع ابتكار التلسكوب الفلكى بدأ عصر الرصد الحديث. لقد استطاع جاليليو وخلفاؤه، بإسقاط صورة للشمس خلال التلسكوب على شاشة بيضاء (بالطبع لا يُنظر قط إلى الشمس مباشرة من خلال التلسكوب)، مراقبة عمليات ذهاب وإياب هذه البقع الدَّكْناء الغريبة. لكن فى القرن التاسع عشر فقط أدرك علماء الفلك أن هذه البقع تأتى وتذهب بإيقاع شبه منتظم، ويبلغ طول دورتها حوالى أحد عشر عامًا. وفى الثمانينيات من القرن العشرين فقط تم ربط إيقاعات تغيرات بقع الشمس مع إيقاعات التغيرات فى حجم الشمس ذاتها، التى «تتنفس» إلى الداخل وإلى الخارج على مدى عقود وقرون.

ويتراوح قطر بقعة الشمس الواحدة ما بين ١٥٠٠ كيلومتر إلى معالم دكناء تمتد فى غير نظام أو اتساق عبر ١٥٠ ألف كيلومتر من جانب إلى آخر. وهى تحدث عادة فى مجموعات تتكون من عدة بقع شمسية تنتشر معًا على امتداد مئات الملايين من الكيلومترات المربعة من سطح الشمس. وتبدو هذه البقع دكناء بالمغايرة مع الخلفية النيرة لسطح الشمس لأنها باردة نسبيًا. و «نسبيًا» هى كلمة السر، لأن درجة حرارة سطح الشمس تبلغ حوالى ستة آلاف كلفن، بينما لا تتجاوز درجة حرارة المنطقة المركزية لبقعة الشمس وأكثرها دكانة أربعة آلاف كلفن، فيما تبلغ درجة حرارة المنطقة الأفتح من بقعة الشمس، وهى المنطقة الخارجية، حوالى ٥٥٠٠ كلفن.

ويعتقد علماء الفلك أن بقع الشمس هى مناطق قامت فيها مجالات مغناطيسية موضعية قوية بكبح مؤقت لتيارات الحمل الحرارى التى تحمل عادة المادة الساخنة من

طبقات الشمس الأعمق إلى أعلى، إلى سطح الشمس. إن المجالات المغناطيسية ـ التى نجح العلماء فى قياسها، كما قاسوا درجة حرارة بقع الشمس، من خلال تحليل خطوط الطيف للضوء القادم من منطقة نشاط بقع الشمس ـ ترتبط دائمًا بالطبع بمجموعات بقع الشمس، وتبدو البقع ذاتها مجرد التجلِّى المرئى الأكثر وضوحًا لسلسلة كاملة من الأنشطة الشمسية. وتتضمن هذه الأنشطة: العواصف الهائلة، والانفجارات النارية التى ترسل ألسنة من مادة الشمس بعيدًا فى الفضاء. ويتنوع كل هذا النشاط عبر دورة النشاط الشمسى التى تمتد أحد عشر عامًا تقريبًا، ابتداء من شمس هادئة إلى حالة نشطة لتعود إلى حالة الهدوء مرة أخرى. إن النموذج الكلى للتغيرات المغناطيسية فى الشمس يستغرق اثنتين من هذه الدورات ليعود مرة أخرى إلى نقطة البداية ـ فى الدورة التى تمتد أحد عشر عامًا يتبادل القطب الشمالى المغناطيسى والقطب الجنوبى المغناطيسى للشمس مكانيهما، ثم يتبادلان المواقع مرة أخرى فى الدورة التالية، ليعود كل منهما إلى مكانه. لذلك يعتقد العديد من علماء الفيزياء الفلكية أن الدورة الأساسية للنشاط الشمسى هى «ضعف دورة بقع الشمس»، أى حوالى ٢٢ عامًا.

وتتبع كل دورة لبقع الشمس النموذج الكلى نفسه، وإن اختلفت التفاصيل من دورة إلى أخرى. وابتداء من النقطة الهادئة من الدورة، تظهر بقع شمسية قليلة عند خطوط عرض حوالى أربعين درجة (٤٠°) شمال وجنوب خط الاستواء الشمسى. وخلال عشرة أيام، ينمو ويكبر حجم كل مجموعة من بقع الشمس، ثم تضمحل ببطء خلال ما يقرب من شهر. ومع نمو الدورة الشمسية، يزداد عدد مجموعات البقع التى تتكون، ويكون تكوُّنها أقرب باطِّراد لخط الاستواء، بحيث تتركز أثناء ذروة النشاط الشمسى قرب خطَّىْ عرض ١٠° شمال و ١٠° جنوب خط الاستواء.

ومع أن هذا النموذج منتظم ويمكن التنبؤ به إلى مدى معين، إلا أننا لا نعرف بالضبط العمليات التى تتم داخل الشمس وتقود الدورة الشمسية. ويقضى أفضل تفسير بأن خطوط القوة المغناطيسية تضيق، وأن دوران الشمس يجعلها تلتف وتجذب مجموعات بقع الشمس نحو خط الاستواء. لكن مهمة واضع النظريات الذى يحاول تفسير السلوك الدقيق لبقع الشمس والدورة الشمسية بشكل عام لم تعد سهلة؛ لأن الدورات الفردية تختلف فيما بينها ليس فى طولها فقط، وإنما فى قوتها أيضًا. وقد لا تمتد بعض الدورات لأطول من تسعة أعوام، تُقاس من الحد الأدنى إلى الحد الأدنى،

بينما يمتد البعض الآخر لحوالى أربعة عشر عامًا. ولأن هذه الحالات القصوى نادرة فإن المتوسط هو أحد عشر عامًا فقط لدورة بقع الشمس. وفى بعض الأحيان، يكون عدد بُقع الشمس قليلاً حتى فى سنوات النشاط الأقصى، وفى دورات أخرى تتكون مئات من البقع أثناء سنوات ذروة بقع الشمس.

وحتى بدون معرفة كيفية عمل الدورة بالتفصيل، لفت بعض الباحثين الانتباه إلى علاقات ظاهرية بين نشاط الشمس، قياسًا ببقع الشمس، والمناخ على الأرض. ويمكن قياس نشاط الشمس بواسطة مؤشر يُسمى رقم بقع الشمس، وهو يرتبط بالمساحة من قرص الشمس المرئى المغطاة بالبقع الدكناء، وعادة ما يتم أخذ متوسط هذه المساحة خلال شهر أو عام. وعندما يكون رقم بقع الشمس يساوى مائة على هذا المقياس، فإن ذلك لا يعنى أن هناك مائة بقعة فردية على قرص الشمس، ولكن هذا الرقم يعطينا مساحة القرص المغطاة ببقع الشمس - فى هذا المقياس، يطابق رقم مائة ذروة قوية وجيدة، بينما يُعد أى رقم يزيد على مائة وخمسين من قَبيل الاستثناء، وفى السنوات الهادئة من دورة الشمس ينخفض رقم بقع الشمس إلى أرقام أحادية ويصل إلى الصفر فى بعض الأحيان.

ومن الأسباب التى جعلت علماء الفلك يستغرقون وقتًا طويلاً لملاحظة أن هناك دورة لبقع الشمس مدتها أحد عشر عامًا، أنه فى العقود التى تلت مشاهدات جاليليو للشمس كان عدد بقع الشمس التى يمكن رؤيتها قليلاً جدًا. ولجزء كبير من القرن بدت الشمس وكأنها تجرب فترة ممتدة من الحد الأدنى للنشاط، وبالطبع لم يكن بإمكان أحد فى ذلك الوقت أن يدرك أن ذلك أمر غير عادى. لقد ازداد نشاط بقع الشمس بشكل عام بعد عام ١٧١٥، وبحلول منتصف القرن التاسع عشر كان لدى علماء الفلك مشاهدات كافية لملاحظة الدورة التى تمتد أحد عشر عامًا، وكان هنريك شواب (Heinrich Schwabe) أول من ذكرها (كدورة عشر سنوات)، ثم راجعها بالتفصيل رودلف وولف (Rudolf Wolff) الذى أوضح أنها استمرت منذ أوائل القرن الثامن عشر. ما الذى حدث فى القرن السابع عشر؟ فى الثمانينيات والتسعينيات من القرن التاسع عشر، قام كل من جوستاف سپورير (Gustav Spörer)، الباحث الألمانى الذى كان مقيمًا فى بوتسدام، ووالتر موندر (Walter Mounder)، الذى كان يعمل فى مرصد جرينتش الملكى فى لندن، بنشر نتائج دراستهما للسجلات القديمة، التى بينت وجود

عدد قليل جدا من بقع الشمس فى الفترة ما بين عامَىْ ١٦٤٥ و ١٧١٥. وواصل موندر محاولته لإقناع زملائه بأهمية هذا الاكتشاف، حتى وفاته عام ١٩٢٨. ولم يهتم علماء الفلك كثيرًا بذلك الاكتشاف، مفضلين الاعتقاد بأن ذلك خطأ ارتكبه علماء القرن السابع عشر الذين فشلوا فى ملاحظة بقع الشمس أو تسجيلها، بدلاً من أن يكون الخطأ من الشمس، التى فشلت فى إنتاج أية بقع شمسية. كان الافتراض الأسهل هو أن علماء الفلك فى القرون السابقة (الذين تُوفُّوا ولا يستطيعون الرد) كانوا غير أكفاء، بدلاً من الاعتقاد بأن الشمس متغيرة ولا تتسم بالكمال. لكن بعض علماء المُناخ والكُتَّاب الذين يبسِّطون العلوم تبنوا فكرة ندرة بقع الشمس فى القرن السابع عشر، وكانت ادعاءاتهم هى التى جذبت إدى إلى الجدل الذى دار فى السبعينيات من القرن العشرين.

حتى وقت قريب جدًا، كانت فكرة تغير مناخ الأرض طبقًا لمقياس زمنى من العقود والقرون تبدو مضحكة لعلماء المناخ، مثلما كان مفهوم تغير الشمس طبقًا للمقياس الزمنى نفسه يبدو مضحكًا لعلماء الفلك. لقد كان المناخ يُعتبر ببساطة نوعًا من «الطقس المتوسط»، الذى قد يعانى من تقلبات عشوائية، بحيث يكون عام أو عقد من الزمن أكثر برودة أو حرارة من غيره، لكن المناخ فى الحقيقة لا يتغير كثيرًا من قرن إلى آخر. غير أن هذه الفكرة بدأت تفقد تأثيرها مع تقدم القرن العشرين، لقد أدرك علماء المناخ والتاريخ أن الطقس فى الثلاثينيات والأربعينيات من القرن العشرين كان أدفأ بشكل واضح عنه فى القرن التاسع عشر. وقد شجع انخفاض درجة الحرارة الذى اجتاح نصف الكرة الشمالى فى الخمسينيات والستينيات من القرن العشرين على المزيد من الاهتمام بالتغير المناخى، وقاد إلى بعض القصص المرعبة عن عصر جليدى جديد قادم. ولكن دراسات التغيرات المناخية فى الأزمنة التاريخية أصبحت محل احترام بفضل الجهود الرائدة التى قام بها هوبرت لَمب (Hubert Lamb) مع مكتب الأرصاد بلندن فى أول الأمر، ثم فى جامعة إيست أنجليا بعد ذلك.

وقد أوضحت هذه الدراسات، من بين العديد من السمات المثيرة الأخرى، أن القرن السابع عشر شهد أشد العقود برودة حتى إنها تُعرف الآن باسم العصر الجليدى الصغير. لقد تجمدت الأنهار والبحيرات فى الشتاء على امتداد أوروبا بدرجة لم يسبق لها مثيل، وتعذَّر نمو محاصيل عديدة فى المناطق الشمالية من أوروبا التى يمكن أن تنمو فيها هذه المحاصيل حاليًا، وامتد البحر الجليدى من القطب الشمالى إلى الجنوب

بشكل كبير لم يره أحد من الأحياء الآن. وعندما واجه بعض علماء المناخ حقيقة أن العالم كان أبرد فى القرن السابع عشر عنه حاليًا، مع افتقادهم لأى تفسير لذلك، افترضوا أن إنتاج الشمس من الحرارة كان أضعف حينذاك، وأشاروا إلى حقيقة الغياب الطويل لبقع الشمس، والذى حدث وقت العصر الجليدى الصغير نفسه، وأصبح معروفًا الآن «بحد موندر الأدنى» اعترافًا بفضل عالم الفلك الذى حاول بقوة أن يشد الانتباه لذلك.

لكن علماء المناخ كانوا بالطبع لا يعرفون شيئًا عن عمل الشمس، ورفض علماء الفيزياء الفلكية ادعاءتهم بوجود ارتباط بين بقع الشمس والطقس واعتبروا أنها تثير الضحك. ولا تزال هذه الادعاءات قائمة، رغم أنها لم تثبت، وإن لم يدحضها أحد أيضًا، مثل هيكل عظمى فى خزانة الفيزياء الشمسية. ولم يكن هناك من يعرف على وجه اليقين هل حد موندر الأدنى حقيقة أم لا. وفى السبعينيات من القرن العشرين، شغلت كل هذه الأمور إدى بدرجة كبيرة، والذى قال للصحفى سام بليكر فيما بعد: «لقد أزعجتنى تلك الإشارات العارضة لبقع الشمس وربطها بتغير متزامن فى مناخ العالم. وتملَّكنى كعالم متخصص فى الفلك الشمسى يقين باستحالة حدوث ذلك، كما أن اهتمامى بالتاريخ جعل إمكانية مضاهاة تأكيدات موندر أمرًا يروق لى». وتوقع إدى أن يجد موندر (وسبورير) على خطأ، وأن مضاهاة دقيقة للسجلات التاريخية سوف تبين أنه لم يكن هناك من احتفظ بسجلات سليمة للنشاط الشمسى حينذاك، وليس عدم وجود بقع شمسية فى أواخر القرن السابع عشر. وسرعان ما اكتشف أنه كان مخطئًا.

وقد أخذت عملية البحث إدى إلى صفحات طويلة من صحف لم تُقرأ منذ مدة طويلة فى الأركان المتربة للمكتبات الفلكية، وإلى أوروبا ومرصد جرينتش الملكى بحثًا عن مخطوطات قديمة.. وكان ما خرج به إدى هو تذكيره بأن علماء العصر الحديث ليسوا أكثر ذكاء أو مثابرة من أسلافهم، ولكنهم فقط أفضل تسلُّحًا بالأدوات والمعدات والتكنولوچيا. لقد كان علماء الفلك فى القرن السابع عشر مهتمين بالطبع بدراسة الشمس - حيث أثار اكتشاف جاليليو لبقع الشمس اهتمامًا علميًا هائلاً. كما أن تسجيلات المشاهدات التى أُجريت فى ذلك الوقت للكواكب ولحلقات كوكب زحل قد أوضحت أيضًا مدى مهارة المراقبين، وكيف سجلوا مشاهداتهم ومراقباتهم بدقة بالغة - وأدرك إدى ألاَّ مجال للشك فى أن المهارة اللازمة لدراسة بقع الشمس لم تكن تنقصهم.

ولكن هل كان لديهم الميل لذلك؟ وهنا أيضًا تحطمت توقعاته. لقد وجد أن العديد من المراقبين قاموا بعمليات رصد منتظمة للشمس عبر فترة «حد موندر الأدنى»، وبحثوا بشكل خاص عن البقع الدكناء، واحتفظوا بسجلات لما عثروا عليه (أو لعدم عثورهم على شيء) تضمنت كل التفاصيل وبنفس الدقة التى احتفظوا بها بسجلات رصد الكواكب. ونظرًا لأن بقع الشمس كانت نادرة فى القرن السابع، كان اكتشاف إحداها يملأ المراقب زهوًا وهو يخبر زملاءه بذلك، وقد يحقق له هذا الاكتشاف قدرًا متواضعًا من الشهرة. كان هناك تلهف للبحث عن بقع الشمس والعثور عليها أثناء عقود فترة «حد موندر الأدنى»، لكنها لم تكن موجودة حتى يمكن رؤيتها ـ لمدة بلغت ٣٢ عامًا، لم تُرصد بقعة شمس واحدة فى النصف الشمالى للشمس. وطوال سبعين عامًا امتدت من ١٦٤٥ إلى ١٧١٥، لم يشاهد أكثر من مجموعة صغيرة واحدة من البقع الشمسية فى كل مرة.

إن إدى الذى انطلق ليطيح بأسطورة ارتباط مناخ العالم بنشاط بقع الشمس، نجح بالفعل فى ترسيخ الارتباط بينهما. لقد استمر فى تطوير البحث بالنظر إلى أزمنة بعد، واستخدم فى ذلك تقنيات أخرى مثل سجلات النشاط الشفقى فى سماء كوكب لأرض (المعروف أن النشاط الشمسى مسبب له)، وقياسات آثار الكربون المشع فى حلقات الأشجار القديمة (المعروف أن سببها جسيمات الأشعة الكونية القادمة من الشمس)؛ وذلك لكى يثبت أن الارتباط بين المناخ والنشاط الشمسى ليس حقيقيًا فقط، وإنما يرجع إلى ما قبل زمن المسيح. إن العالم يصبح أبرد عندما تكون الشمس هادئة ـ أى حين يوجد القليل من بقع الشمس لعقود متتالية من الزمن، وحتى ذروات دورة نشاط الشمس تكون منخفضة.

ولُخصت الأدلة فى اجتماع عقدته الجمعية الملكية فى لندن فى فبراير ١٩٨٩. لقد اختزن خشب الأشجار (الحية أو الميتة) سجلات نشاط الشمس الذى يرجع إلى ما قبل بداية الرصد الفلكى الحديث لبقع الشمس بكثير، وذلك فى شكل ذرات كربون ـ ١٤ المشع. وينتج الكربون ـ ١٤ من تفاعل الأشعة الكونية مع ذرّات النيتروچين فى الغلاف الجوى، وتأخذ الأشجار الحية بعض ذرات هذا الكربون المشع وتختزنها فى خشب حلقات نموها السنوى. ويمكن عن طريق عد هذه الحلقات الخشبية من الخارج إلى الداخل تحديد تاريخها ببساطة، كما يمكن قياس نسبة الكربون ـ ١٤ فى كل حلقة. وبمقارنة محتوى الحلقات من الكربون المشع الذى اختُزن عبر القرنين الماضيين مع

السجلات الفلكية لنشاط الشمس، أمكن إثبات أن كمية الكربون ـ ١٤ التى يتم اختزانها كل عام ترتبط بشكل مباشر بمستوى نشاط الشمس.

وخاطب شارلز سونت (Charles Sonett)، الباحث بجامعة أريزونا، الحاضرين قائلاً إن هناك دورة تسيطر على تسجيل الأشجار لنشاط الشمس، وإن طول هذه الدورة مائتا عام. ولقد ظهرت دورة المائتى عام فى سمك الحلقات ذاتها. تميل الحلقات إلى أن تكون أكثر ضيقًا كل قرنين؛ مما يشير إلى أن الأشجار تعانى نوعًا من الضغط والإجهاد. ويفترض النموذج أنه كان يوجد أكثر من عصر جليدى صغير وليس عصرًا واحدًا، مع انخفاض نشاط الشمس وكون الطقس يصبح أكثر برودة كل قرنين من الزمان.

فى الحقيقة، ظل سونت يردد ذلك لسنوات طويلة، قبل اجتماع الجمعية الملكية فى فبراير ١٩٨٩. ورغم أن إدى شرع فى دحض هذا الافتراض، إلا أن البحث الذى أعده إدى، هو دون غيره الذى جعل الدراسات التى قام بها سونت تحظى حاليًا بالاحترام الكافى. لماذا؟

الشمس المنكمشة

ونتيجة لاهتمامه بسجلات بقع الشمس القديمة، علم إدى بوجود مجموعة أخرى من المشاهدات الشمسية تبعث على الحيرة، قام بها المرصد الملكى بجرينتش. فمنذ عام ١٧٥٠، كان علماء الفلك فى المرصد يسجلون يوميًا قياسات لحجم الشمس (كان الطقس يسمح بذلك). وكانت عمليات الرصد تجرى بأداة تُسمى تلسكوب العبور، الذى يُركب بحيث يمكنه التأرجح إلى «أعلى وأسفل» على امتداد خط شمال ـ جنوب، ولكنه لا يستطيع التحرك من جانب إلى آخر. وهذه الأداة بالذات هى التى تحدد، بناء على اتفاق دولى، خط الزوال الصفرى. ويُعتبر خط الشمال ـ الجنوب عبر التلسكوب هو دائرة خط زوال جرينتش، التى يُحدد من خلالها خطوط الطول، بينما يحدد مرور الشمس مباشرة عبر التلسكوب وقت الظهيرة، توقيت جرينتش المتوسط. ومع أن السجلات الخاصة بقياسات قطر الشمس لم تبدأ إلا بعد «حد موندر الأدنى»، فإن إدى ظل فضوليًا بالنسبة لها. وخلال زيارة عمل لمركز هارفارد ـ سميثسونيان للفيزياء الفلكية، فحص إدى السجلات مع أران بورنازيان (Aran Boornazian)، ورأى على الفور أن هناك اتجاهًا مستمرًا إلى الانخفاض فى قياسات قطر الشمس ـ وعند أخذ القيمة الظاهرية، فإن السجلات تقضى بأن الشمس تنكمش بشكل مثير.

فى البداية، لم يصدق العالمان ما رأياه. وافترضا افتقار قياسات علماء الفلك السابقين إلى الدقة، لأنهم كانوا يفتقرون إلى الساعات الحديثة وأدوات القياس الدقيقة. لكن عندما درس إدى وبورنازيان نُسخًا من سجلات مماثلة فى مرصد البحرية الأمريكية بواشنطن، وجدا نفس الاتجاه. إن علماء الفلك على جانبَى الأطلنطى، قاموا بنفس نوع المشاهدات على امتداد القرنين التاسع عشر والعشرين، وتوصلوا إلى أرقام متماثلة تفترض انكماشًا سريعًا للشمس. وأصبح واضحًا أن هناك شيئًا ما كان «يحدث». وبالتالى عاد إدى وبورنازيان إلى السجلات واستخرجا منها المعلومات الدالة على انكماش الشمس، ورغم ذعر العديد من زملائهما قاما بنشرها.

من المهم تقييم وتقدير كيفية إجراء هذه القياسات، على نحو دقيق؛ لما لذلك من تأثير حاسم على الحجج التى أُثيرت عن مدى الثقة فى تلك المشاهدات. لقد كان المراقبون الأوائل يحددون قطر الشمس بقياس الزمن الذى يستغرقه مرور صورة الشمس عبر شعرة التعامد فى بؤرة العدسة العينية للتلسكوب، عند انتقال الشمس من الشرق إلى الغرب فى السماء بسبب دوران الأرض. كانوا يبدءون بالعد عندما تلمس حافة الشمس شعرة التعامد ويتوقفون عندما يتركها الجانب الآخر من الشمس. لكن المراقبين الأوائل لم يكن لديهم بالطبع ساعات توقيت أو ساعات رقمية لمساعدتهم فى هذه المهمة. وبدلاً من ذلك، كان عليهم عد دقات ساعة بندولية عند مرور صورة الشمس عبر شعرة التعامد؛ مما يعنى أن قياساتهم لا يمكن أن تكون بالدقة التى تتميز بها القياسات الحديثة. ومن ثَم اعتمد إدى وبورنازيان أساسًا على السجلات ابتداء من عام ١٨٤٥، عندما زُود المرصد بنظام توقيت أكثر دقة (الكرونوغراف(*)). وتواصلت السجلات المستمرة حتى عام ١٩٥٤ عندما انتقل المرصد من لندن إلى هرستمنسو، فى سوسكى، وتوقفت عمليات رصد قطر الشمس يوميًا من جرينتش.

وكانت هذه المجموعات من المشاهدات، بجانب بيانات مرصد البحرية الأمريكية، هى التى أدت إلى ادعاء أن الشمس تنكمش بمعدل ١٥٠٠ كيلومتر تقريبًا فى القرن الواحد - وهو جزء كبير من قطرها البالغ ١,٣٩٢,٠٠٠ كيلومتر. وبمقياس الزاوية التى تكونها الشمس فى السماء، والتى تبلغ حوالى ٣٢ دقيقة من الدائرة التى تمثل مسارها

(*) أداة لقياس الوقت وتسجيله. (المترجم).

الظاهرى، فإن الانكماش المفترَض يبلغ ثانيتين(*) فى كل قرن. إن الأمر يبدو مدهشًا، ولكن كان لدى إدى بعض الأدلة الأخرى لمساندة هذا الادعاء.

عندما يحدث كسوف للشمس بواسطة القمر، يحدث إظلام تام فى بعض الأحيان، وتبقى حلقة ضوء مرئية حول حافة القمر فى أحيان أخرى. ويحدث مثل هذا الكسوف الحلقى عندما يكون القمر فى مداره أبعد قليلاً من الأرض، بحيث يغطى أقل قليلاً من ٣٢ دقيقة، وهى الزاوية التى تكونها الشمس فى السماء، (وهى مصادفة مدهشة أن يبدو حجم القمر والشمس متماثلين عند رؤيتهما من الأرض). وفى عام ١٥٦٧، رصد عالم الفلك كريستوفر كلافيوس (Christopher Clavius) كسوفًا حلقيًا من روما. لكن الحسابات الحديثة تفترض أن القمر كان قريبًا جدًا من الأرض وقتها بحيث يستحيل حدوث ذلك ـ «إلا إذا» كانت الشمس فى عام ١٥٦٧ أكبر قليلاً عنها حاليًا!

هناك خلاف حول حقيقة ما رآه كلافيوس على وجه التحديد، وهل كان كسوفًا حلقيًا بالفعل، أم أنه رأى فقط وهج ضوء قادم من الشمس مارٍّ عبر الوديان بين الجبال عند حافة القمر؟ للأسف، لم تكن هناك صور فوتوغرافية فى القرن السادس عشر لتخبرنا. وحتى لو كان كلافيوس قد رأى كسوفًا حلقيًا، فإن ذلك لا يدل بدقة على حجم الشمس فى ذلك الوقت، ولكنه يعطى مجرد فكرة بأنها كانت أكبر منها حاليًا. ورغم أنه دليل ظرفى وعرضى يدعم حالة سجلها تلسكوب العبور، فإن إدى وبورنازيان اعتبراه دليلاً مقنعًا.

لكن آخرين لم يقتنعوا. ورفض أغلب علماء الفلك ادعاءات فريق هارفارد ـ سميثسونيان، بالرغم من هذا الدليل الموثق. وأشارت الانتقادات إلى أن عمليات الرصد التى تمت فى جرينتش (وتلك التى تمت بالفعل فى واشنطن) قام بها مجموعة من الفلكيين المختلفين، واستخدموا فى ذلك ساعات وتقنيات مختلفة. لقد شارك فى عمليات القياس فى جرينتش ستة مراقبين مختلفين فى كل عام، واستخدم كل منهم أفضل تقدير لديه لتحديد التوقيت الذى لمست حافة الشمس فيه شعرة تعامد التلسكوب. وعندما حسب باحثون آخرون متوسط قطر الشمس الذى حدده كل واحد من المراقبين الستة، وجدوا أنه حتى فى العام الواحد كانت الأرقام التى قدمها مراقبان مختلفان تختلف بأكثر من ألف كيلومتر.

(*) الثانية جزء من ستين جزءًا من الدقيقة الزاوية. (المترجم).

ولكن بقيت ورقة أخرى بحوزة إدى؛ إذ استخدم المراقبون السابقون تقنية أخرى بالإضافة إلى عد الزمن الذى تستغرقه الشمس لعبور شعرة تعامد التلسكوب. فبينما تكون صورة الشمس فى الظهيرة فى مجال الرؤية، يسارع أحد المراقبين إلى قياس القطر الرأسى للشمس، وهو المسافة بين القطبين: الشمالى والجنوبى عبر الصورة، ويُستخدم فى ذلك محدد قياس ميكرومترى يُستعمل مع التلسكوب لقياس الأبعاد والزوايا البالغة الصغر. وقد أوضحت هذه القياسات نوع التأثير نفسه الذى بينته القياسات الأفقية ـ وهو التناقص فى قطر الشمس ـ ولكنه بمقدار النصف، أى بمعدل ثانية واحدة تقريبًا من الدائرة التى تمثل مسار الشمس الظاهرى فى كل قرن. افترض إدى، فى البداية، أن هذه التقنية قد تكون أقل دقة من تقنية تسجيل الوقت، نظرًا للسرعة التى يتعين أن يعمل بها المراقب، فضلاً عن التآكل الذى يصيب براغى محدد القياس الميكرومترى نتيجة لاستخدامه عدة سنوات. لكن عندما زار المرصد الملكى القديم بجرينتش، وجرب هذه التقنية بنفسه، وجد أنه كان مخطئًا. فى الواقع، كان لدى المراقب وقت أكبر للحكم على موضع القمة والقاعدة على صورة الشمس فى شعرة تعامد التلسكوب، وهناك احتمال أن تكون هذه القياسات أكثر دقة من القياسات الأفقية.

ومع ذلك، بقيت أسئلة تنتظر الرد حول مدى إمكانية الاعتماد على بعض السجلات، والعدد الصحيح للمعدل الذى تنكمش به الشمس يتوقف على قرارك فى اختيار المشاهدات التى تثق فيها أكثر. وفسر إدى وبورنازيان القياسات الرأسية بأنها تقضى بتناقص فى القطر الزاوى للشمس بمقدار ثانية واحدة فى كل قرن، فى حين فسرها ساباتينو صوفيا وزملاؤه بمركز ناسا جودار سپيس فليت بأنها تقضى بانكماش لا يزيد على ٠,٢ ثانية فى القرن الواحد.

وفى عام ١٩٧٩، أهاج إدى عش الدبابير بادعاءاته، وبدأ العديد من علماء الفلك يدخلون الحلبة، وادعى بعضهم أن لديه إثباتًا على أن قطر الشمس لم يتغير، بينما أكد فريق آخر اقتناعه بوجود انكماش بالفعل ولكنه أقل بكثير مما يدعيه إدى وبورنازيان. واستُخرجت مختلف أنواع السجلات القديمة المتربة من الملفات وأُعيد تفسيرها وتأويلها. وقد فحص إيروِن شاپيرو (Irwin Shapiro)، الباحث فى معهد ماساتسوشيتس للتكنولوجيا (Mit)، سجلات قديمة لحالات عبور كوكب عطارد عبر

وجه الشمس. إنها تقنية جميلة، ولكن لا يمكن تطبيقها إلا ١٣ مرة تقريبًا فى كل قرن، وذلك عندما يُشاهد عطارد، من الأرض، أثناء مروره عبر قرص الشمس. ولأننا نعلم المسافة التى تفصل الشمس عن الأرض، وكذلك المسافة من عطارد للشمس، يستطيع الفلكيون حساب حجم الشمس بقياس الزمن الذى يستغرقه عطارد للمرور عبر قرص الشمس. وأثبت شاپيرو باستخدام هذه التقنية أن الشمس لم تنكمش منذ عام ١٧٠٠ إلا بمعدل لا يزيد على ٠٫٣ ثانية كل قرن، ولم يستبعد احتمال عدم انكماشها أساسًا.

وهناك تقنية رائعة أخرى لقياس قطر الشمس تستند على ظاهرة كسوف الشمس. فالوضع الصحيح لحافة مسار كسوف الشمس (ظِلّ القمر على الأرض) يتوقف على موضع كل من الشمس والقمر، وبُعد كل منهما عن الأرض، وهى مسافات معروفة بدقة شديدة، بل ويمكن حسابها بالنسبة لحالات كسوف وقعت منذ قرون مضت. ويتوقف أيضًا على حجم القمر (الذى لم يفترض أحد أنه تغير) وحجم الشمس. وقد حدث فى عام ١٧١٥ كسوف كامل للشمس رُصد من إنجلترا، وجمع السير إدموند هالى، الذى أصبح بعد ذلك عالم الفلك الملكى، بيانات عن الكسوف من مراقبين عديدين. ويمكن استخدام هذه البيانات لاستنتاج موقع حافة الظل، وبالتالى حجم الشمس فى ذلك العام. إن إعادة تحليل تلك السجلات التى أُجريت عام ١٩٨٠ قادت إلى أشد القضايا العملية إثارة للبهجة والسخرية فى آنٍ واحد، وذلك بعد الجمع بين كافة النتائج.

لقد تضمن عدد مجلة «نيتشر» الصادر فى ١١ من ديسمبر ١٩٨٠ مقالاً بارزًا بعنوان: «ثبات قطر الشمس على امتداد الـ ٢٥٠ عامًا الماضية» ؛ كتبه ثلاثة من علماء الفلك البريطانيين، هم: چون پاركنسون (John Parkinson)، ولزلى موريسون (Leslie Morison) وريتشارد ستيفنسون (Richard Stephenson). واستند المقال على الدراسات الخاصة بدليل دائرة خط الزوال، وحالات مرور عطارد على وجه الشمس، ورصد حالات الكسوف (بما فى ذلك كسوف عام ١٧١٥)، وانتهى إلى أنه «لا يوجد تغير قابل للرصد فى قطر الشمس عبر القرون».

وفى الأسبوع نفسه، نشرت مجلة «ساينس» الأمريكية بعددها الصادر فى ١٢ من ديسمبر ١٩٨٠، مقالاً قدم إسهامًا آخر فى القضية. وحمل عنوان: «مشاهدات لتغير محتمل فى نصف قطر الشمس ما بين عامَىْ ١٧١٥ و ١٩٧٩». وكان وراء هذا المقال فريق ضم خمسة من علماء الفلك البارزين، من بينهم أربعة أمريكيين، هم: داڤيد دونهام

(David Dunham)، وساباتينو صوفيا (Sabatino Sofia)، وآلان فيالا (Alan Fiala)، وداڤيد هيرالد (David Herald)، أما الخامس فهو البريطانى پول موللر (Paul Muller). وقارن هذا الفريق العلمى سجلات كسوف عام ١٧١٥ مع بيانات عن كسوف شوهد فى أستراليا عام ١٩٧٦، وآخر شوهد فى أمريكا الشمالية عام ١٩٧٩، وتوصلوا إلى أنه «تم رصد انخفاض فى نصف قطر الشمس فى الفترة ما بين ١٧١٥ و ١٩٧٩ يُقدر بـ ٠,٣٤ ± ٠,٢ ثانية».

وكأنه يجب أن يقذفهم أحد بالبيض ليضع حدًا لهذا الخلاف، لكن رغم تصريحاتهم الجازمة يمكن فى الحقيقة أن يكون كلا الفريقين على حق. إن حل اللغز يكمن فى «مقياس الخطأ» بالنسبة للأرقام التى استشهدوا بها، وتقديرهم الخاص لمدى الثقة فى الدليل الذى استندوا عليه. لقد قال دونهام وزملاؤه إن الشمس تنكمش بمعدل يتراوح بين ٠,٥٤ - ٠,١٤ (أى ٠,٣٤ ± ٠,٢) ثانية كل قرن. بينما رأت مجموعة پاركنسون أنه «لا» يوجد دليل على انكماش الشمس، وأن مشاهداتهم تنفى إمكانية وجود تغير يزيد على ٠,١٥ ثانية لكل قرن (الرقم الذى استشهدوا به «لثبات» قطر الشمس كان «تغيرًا» قيمته ٠٨ ± ٠,٠٧ ثانية لكل قرن، وفسروا ذلك بأنه صفر فى حدود مقياس الخطأ، لكن الـ ٠,١٥ ثانية التى أقروا بها تقع عند الحد الآخر من «مقياس الخطأ»).

وآن الأوان دون شك لكى يلقى شخص ما نظرة طويلة ودقيقة وقوية على «كل» البيانات المتاحة، ويحاول أن يكتشف ما تفعله الشمس حقيقة. وكان ذلك مقياسًا للاهتمام الذى أثاره ادعاء إدى وبورنازيان الأصلى بأن علماء الفلك، على ما يبدو، غير منزعجين من أفتراض أن الشمس قد تنكمش بمعدل ٠,٢ ثانية «فقط» كل قرن. إن مثل هذا الانكماش للشمس «ككل» كفيل بأن يطلق كل عام مقدارًا من الطاقة أكبر عشرين مرة مما تنتجه الشمس حاليًا، وأن يسحب البساط من تحت كل النماذج القياسية للشمس، ناهيك عن لغز النيوترينو الشمسى. وكان رُونْ چيليلند هو الذى وضع الأمور فى منظور مشجع «ولو قليلاً»، وذلك بتوضيح أن التغيرات جزء من دورة طويلة المدى لنبض الشمس الرقيق، مع ما يتضمنه ذلك من أن هذه التغيرات هى بالفعل شىء له علاقة بطبقات الشمس الخارجية ـ الغلاف الجوى للشمس ـ وليس بقلبها والجزء الداخلى منها.

الشمس التى تتنفس

أخذ چيليلند مجموعات البيانات الخمس المتوافرة التى تحتوى سجلات طويلة المدى

لقياسات قطر الشمس، وأخضع تلك البيانات لتحليل إحصائى دقيق، مستخدمًا تقنيات طورها الرياضيون للعثور على الاتجاهات طويلة المدى والتغيرات الدورية فى مثل تلك العينات. وكانت مجموعتان من البيانات التى استخدمها چيليلند هى نفسها التى استخدمها إدى وبورنازيان، فى حين تتضمن المجموعتان الإضافيتان من البيانات سجلات مرور عطارد عبر قرص الشمس، أما المجموعة الخامسة فهى تجميع لتسجيلات أوقات حدوث حالات كسوف الشمس المختلفة. وقد وفرت له تلك السجلات التاريخية معلومات عن التغيرات فى حجم الشمس لفترة امتدت ٢٦٥ عامًا، ابتداء من كسوف الشمس الذى حدث عام ١٧١٥ حتى عام ١٩٨٠.

وتضمَّن عدد سبتمبر ١٩٨١ من «مجلة الفيزياء الفلكية» (Astrophysical Journal) نتائج تحليل چيليلند. وهو الأمر الذى كان له دلالته فى حد ذاته. فرغم أن مجلتَىْ «نيتشر» و«ساينس» الأسبوعيتين لهما اعتبارهما وموضع ثقة واحترام، فإنهما بطبيعتهما يلجأ إليهما العلماء من أجل النشر السريع، وبعض الأبحاث التى نُشرت بسرعة على صفحاتهما ثبت بعد ذلك أنها كانت خاطئة أو ناقصة. أما «مجلة الفيزياء الفلكية»، فقد بنت شهرتها على نظام صارم لمراجعة الأبحاث التى ترد إليها، حيث تعرضها قبل النشر على خبراء آخرين. ولا يعنى ذلك التقليل من مصداقية المجلتين الأسبوعيتين، فلقد نشرتُ أبحاثًا لى فى هاتين المجلتين اللتين كانتا أول من نشر أبحاثًا غير تقليدية عن البقع الشمسية والتغيرات فى قطر الشمس. وعندما ظهرت نتائج چيليلند فى «مجلة الفيزياء الفلكية»، كان ذلك دليلاً إضافيًا على مصداقية هذه النتائج.

ولعل ما يدل على مدى أهمية بحث چليليلند، أن هذا الموضوع لم يشهد أى تطور جديد منذ أن نشر نتائج التحليل الذى قام به.

ماذا وجد چيليلند؟ بتوليف المجموعات الخمس من البيانات، أوضح التحليل الإحصائى أن هناك تناقصًا طويل المدى فى حجم الشمس يبلغ ٠,٠١٪ لكل قرن، وأن ذلك استمر منذ بداية القرن الثامن عشر على الأقل. بالطبع لازالت هناك مشاكل فيما يتعلق بعدم دقة العديد من القياسات، لكن الأمر كما قال چيليلند «ليس مجرد تشبث عنيد لإثبات وجود اتجاه لتناقص قطر الشمس كل قرن منذ عام ١٧٠٠، وإنما تشير الأدلة الراجحة حاليًا إلى أن هذه فيما يبدو هى الحقيقة». والشىء الأكثر إثارة للدهشة، ما أوضحه التحليل بوجود نموذجين لدورتَىْ تغير فى حجم الشمس.

أحد هذين النموذجين هو نبض لطيف تتنفس الشمس من خلاله إلى الداخل والخارج، على امتداد دورة تبلغ ٧٦ عامًا. وكان بعض الباحثين قد وجدوا إشارات لذلك من قبل، باستخدام مجموعات محدودة للغاية من البيانات، لكن چيليلند أثبت أن التأثير حقيقى، ويغطى مدى يصل إلى ٠,٠٢٪ من نصف قطر الشمس، أى حوالى ١٤٠ كيلومترًا. وقد تصبح الصورة أكثر تعقيدًا بالتلميح (مجرد تلميح) إلى أن هناك ذبذبة أصغر فى حجم الشمس على امتداد الدورة الشمسية المعتادة، دورة الأحد عشر عامًا. والمحير فى الأمر، أن كلاً من تذبذب الأحد عشر عامًا وتذبذب الستة والسبعين عامًا يتبع قاعدة إبهام اليد، بمعنى أنه كلما كان حجم الشمس أكبر كان عدد البقع الشمسية اقل.

وتنطبق القاعدة نفسها على تناقص نصف قطر الشمس وازدياد نشاط البقع الشمسية منذ القرن السابع عشر. يُضاف إلى ذلك أن علماء الفلك تشككوا طويلاً أن يكون هناك تواتر(*) للبقع الشمسية طوله ثمانون عامًا، وربط بعض علماء المناخ بين ذلك ودورة ظاهرية مدتها ثمانون عامًا لمتوسط درجات الحرارة على الأرض. والسؤال هنا: هل يمكن أن يكون هناك ارتباط بينهما وبين إيقاع نبض الشمس والذى تبلغ دورته ٧٦ عامًا؟

ربما يكون تناقص نصف قطر الشمس هو أهم ما أسفر عنه التحليل من معلومات، نظرًا لأن نظرية تطور النجوم تتوقع أن تنمو الشمس، وإن كان ذلك بكمية صغيرة وغير قابلة للرصد. إن أفضل تخمين فى الوقت الحالى أن يكون ذلك أيضًا جزءًا من دورة نبض طويلة وبطيئة - وهو تخمين يعززه الدليل على وجود بقع شمسية قبل «حد موندر الأدنى» بمئات وآلاف وملايين السنوات. غير أن اكتشاف دورات أقصى يحمل تداعيات قد يكون لها قيمة عملية خلال العقود القليلة القادمة.

كان نصف قطر الشمس فى عام ١٩١١ عند حده الأدنى، فى دورة الستة والسبعين عامًا، وقد أظهرت الشمس حينذاك أيضًا نشاطًا قويًا من خلال دورتها للبقع الشمسية. ومن ثَم كان يتعين أن يكون الحد الأدنى التالى لنصف قطرها فى عام ١٩٨٧. ولن

(*) التكرر النظامى للعمليات أو الأحداث. (المترجم).

يستطيع أحد أن يؤكد ما إذا كانت الشمس قد بدأت فى التمدد مرة أخرى فى عام ١٩٨٨، وظل الأمر كذلك حتى مرت عدة سنوات، أُجريت خلالها عدة مجموعات من القياسات. غير أن النتائج الحديثة تتفق مع النموذج القائل بأن الشمس الأصغر حجمًا ترتبط بزيادة نشاط بقع الشمس. لقد حدثت آخر ذروة لدورة الأحد عشر عامًا فى عامَىْ ١٩٧٩ و ١٩٨٠ تقريبًا، عندما ارتفع متوسط عدد البقع الشمسية المقاسة من ٢٨ بقعة فى عام ١٩٧٧ إلى ٩٣ بقعة فى عام ١٩٧٨ ثم ١٥٥ فى عام ١٩٧٩، وهو تقريبًا العدد نفسه المسجل فى عام ١٩٨٠، وهو ما يمثل ذروات عالية. وتمر الشمس وقت كتابة هذه الكلمات بحالة هدوء، ولم يتجاوز عدد البقع الشمسية فى عام ١٩٨٦ تسع بقع، ثم سرعان ما بدأ العدد فى الزيادة استعدادًا للذروة التالية لدورة الأحد عشر عامًا فى بداية ١٩٩٠(*). لقد أوضحت المشاهدات أن ذروة أخرى ستحدث، وأنها تتطابق بدرجة كبيرة مع حسابات چيليلند. لكن يمكن أن نتوقع عندئذ ذروة أصغر من النشاط فى المرة التالية، خلال ما يقرب من أحد عشر عامًا من الآن، أى فى بداية القرن الواحد والعشرين.

وفى بحث نشرته مجلة كَلِيماتِكْ شينْج «التغيرات المُناخية» (Climatic Change) فى مارس ١٩٨٢، تحرى چيليلند التداعيات العملية لكل ذلك. ولقد وجد أن العديد من سمات نموذج التغيرات فى درجة حرارة الأرض ابتداء من ١٨٥٠ يمكن تفسيرها فى ضوء تضافر تأثيرات الغبار البركانى (الذى يرتفع عاليًا فى الغلاف الجوى ويعترض طريق حرارة الشمس) وتراكم ثانى أكسيد الكربون فى الهواء (الذى يختزن الحرارة فيما يُسمى بتأثير الصوبة الزجاجية) ودورة الستة والسبعين عامًا المرتبطة بتنفس الشمس.

وإذا كان چيليلند على حق، فإن تأثير الشمس خلال الثلاثين عامًا الماضية عمل فى الاتجاه المعاكس لتأثير الصوبة الزجاجية، محاولاً أن يبرد الأرض بينما تتمدد الشمس. لكن بما أننا تجاوزنا الحد الأدنى لدورة الستة والسبعين عاما الحالية، فإن الشمس ستبدأ خلال العقود الثلاثة القادمة فى بث قدر أكبر من الحرارة، بنسبة زيادة قدرها ٠,٢٨٪، وبما يرفع درجة حرارة الأرض بمقدار ربع درجة مئوية، وهو ما يُعتبر أعلى من أى تأثير للصوبة الزجاجية.

(*) وصلت الذروة فى موعدها. وعندما كان هذا الكتاب تحت الطبع، عاد نشاط الشمس إلى التناقص مرة أخرى.

وهذا التأثير نفسه نتاج أنشطة الإنسان، بما فى ذلك احتراق الفحم والبترول، وتدمير الغابات الاستوائية. ويتوقع خبراء المناخ استمرار تراكم ثانى أكسيد الكربون فى الهواء، مما يؤدى إلى رفع درجة حرارة الأرض خلال القرن الحادى والعشرين. وبتضافر تأثيرَى الشمس والصوبة، يمكن لارتفاع درجات الحرارة أن يكون أسرع مما قام بحسابه أى من خبراء المناخ.

وأحد هؤلاء الخبراء هو توم ويجلى (Tom Wigley)، الباحث فى جامعة إيست أنجليا. وقد ناقش هذه التداعيات فى اجتماع الجمعية الملكية فى فبراير ١٩٨٩ـ أشار توم إلى أن الأرض تستغرق وقتًا طويلاً لكى تستجيب للتغيرات الصغيرة فى الحرارة التى تصلها من الشمس (لأن المحيطات أساسًا تستغرق وقتًا طويلاً لكى ترتفع درجة حرارتها أو تنخفض)، لذلك قد لا يتوقع علماء المناخ ظهور تقلبات صغيرة جدًا فى سجلاتهم خلال دورة الأحد عشر عامًا ـ حيث ليس لدى الأرض وقت لتستجيب للانخفاض فى إنتاج الشمس من الحرارة قبل أن يبدأ الإنتاج فى الزيادة مرة أخرى. لكن كما أشار ويجلى، فإن دورة مدتها مائتا عام (أو ٧٦ عامًا) ستكون طويلة بما يكفى لكى تصبح حتى التغيرات الصغيرة فى إنتاج الشمس، فى حدود ١٪ تقريبًا، مسئولة عن تقلبات مناخية بمقياس العصور الجليدية الصغيرة.

ما يزال هذا الافتراض محل خلاف وغير مُثْبت (خاصة بالنسبة لعلماء الفيزياء الفلكية)، ولكنه يشير إلى الطريق لبحوث مستقبلية ذات قيمة علمية كبيرة، تربط بين نشاط الشمس والمناخ. وكان من فوائد ذلك، التأكيد على ضرورة بذل مزيد من الجهود لقياس حجم الشمس.

وقد شهد عام ١٩٨٣ أحد هذه الجهود، عندما حدث كسوف للشمس كان يمكن رؤيته من جزيرة جاوة، وقامت حملة تولت تمويلها مجلة نيو ساينتيست (New Scientist) وجامعة لندن، بقياس حافة مسار الكسوف بدقة، وذلك بمساعدة ٢٥ من طلبة السنوات النهائية بمدرسة محلية، والذين شكلوا سلسلة آدمية طولها ثلاثة كيلومترات تكون زوايا قائمة مع حافة مسار الكسوف فى مجموعه الكلى. وأثبتت مشاهداتهم أن حجم الشمس الحالى أصغر بحوالى ٠,٢ ثانية، أى حوالى ٠,٠١٪ عن القيمة القياسية التى سجلها الرصد الفلكى فى القرن التاسع عشر واستخدمها علماء الفلك منذ ذلك الحين.

وتَحقَّق الاختبار النهائى لفكرة تنفس الشمس عندما استُعلمت الأدوات الحديثة الأدق بكثير مما استخدمه العلماء فى القرون السابقة، وقامت هذه الأدوات بتسجيل قياسات يومية لقطر الشمس يمكن الاعتماد عليها. وعقب أبحاث إدى، استعان العلماء بتلسكوب زوالى جديد فى مرصد الارتفاعات العالية بولاية كولورادو، وكان هذا التلسكوب آليًا، بحيث يحدد زمن مرور الشمس وقت الظهيرة بدقة أكبر من أى وقت مضى. واستخدم الباحثون أكثر من ٥٠٠ صمام ثنائى حساس للضوء لقياس الأبعاد الرأسية والأفقية لقرص الشمس كل يوم وقت الظهيرة ـ لكن الأمر سيستغرق خمس سنوات على الأقل قبل أن تكشف القياسات هل تغير حجم الشمس أم لا. وإذا كان چيليلند محقًا، فإننا لن نعثر بالطبع على انكماش خلال العقد القادم، ولكن بالأحرى سنجد أن الشمس تتمدد ـ وهذا التمدد من شأنه تدعيم مصداقية فكرة انكماشها منذ القرن السابع عشر.

وبينما ينتظر علماء الفلك تلك البيانات الجديدة حقًا، كشف فريق فرنسى بقيادة إليزابيث ريب (Elizabeth Ribes) فى مرصد باريس بعض البيانات القديمة «الجديدة»، لتُضاف إلى مجموعات بيانات چيليلند الخمس. وكان صاحب الدراسة بالفعل هو چان بيكار (Jean Picard)، الذى أعدها فى النصف الثانى من القرن السابع عشر. وكان بيكار، الذى يُعد من رواد علماء الفلك، قد صمم أدوات بالغة الدقة، وقام من بين ما قام به، بإجراء عدة قياسات لحجم الشمس حتى قبل أن تبدأ القياسات اليومية المنتظمة بواسطة تلسكوب العبور فى جرينتش. وبعملية إعادة تحليل دقيقة لسجلاته القديمة، وجد فريق باريس فى منتصف الثمانينيات من القرن العشرين أن الشمس كانت أثناء «حد موندر الأدنى» أكبر بالفعل بحوالى ألفَىْ كيلومتر من حجمها الحالى. وربما كان الدليل الأكثر حسمًا، أنهم وجدوا تناقصًا واضحًا فى حجم الشمس الذى سجله المراقب الماهر بيكار «نفسه» وباستخدام «نفس» الأدوات والتقنيات، ويُقدر هذا التناقص بثلاث ثوانٍ فى الفترة ما بين عام ١٦٣٧، أى فى قمة فترة «حد موندر الأدنى»، وعام ١٧١٨، عندما عادت البقع الشمسية بقوة متواضعة. ويمكن استخدام سجلات بقع الشمس القليلة التى ظهرت خلال فترة «حد موندر الأدنى» أيضًا؛ لاستكشاف سلوك الشمس فى ذلك الوقت.

ورغم أن عدد البقع الشمسية كان قليلاً فى فترة «حد موندر الأدنى»، إلا أنها كانت أندر بعض الشىء فى السنوات ١٦٧٤ و ١٦٨٤ و ١٧٠٥ و ١٧١٦؛ مما يشير إلى أن دورة الأحد عشر عامًا كانت مستمرة، فى ذلك الوقت، ولكن بإيقاع هادئ. وخلال كل تلك

السنوات ـ فيما عدا عام ١٧١٦ ـ لم يكن من الممكن رؤية البقع الشمسية إلا فى النصف الجنوبى من الشمس، واحتفظ مراقبو ذلك الوقت برسومات دقيقة لما شاهدوه. وليس هناك غموض بالنسبة لتلك الرسومات، نظرًا لقلة البقع الشمسية، بحيث يمكن رسم قصة حياة كل بقعة شمسية وهى تتحرك عبر قرص الشمس المرئى نتيجة لحركة دوران الشمس. وتبين قياسات الدوران القائمة على هذه الرسومات القديمة أن الشمس كانت تدور بشكل أبطأ، فى الوقت الذى كانت فيه أكبر حجمًا. وذلك بالضبط ما يمكن توقعه إذا كانت الزيادة فى الحجم تمثل تضخمًا حقيقيًا للمادة فى الجزء الخارجى من الشمس. ومثل المتزلج الذى يدور حول نفسه وذراعاه ممدودتان إلى الخارج، نجد الشمس تبطئ من دورانها عند تمدد طبقاتها الخارجية. وقد أشارت ريب وزملاؤها، فى عام ١٩٨٧، إلى أن المشاهدات تتفق بالأحرى مع نموذج السلوك المتوقع لنبضة حقيقية للطبقات الخارجية للنجم، وليس بالتلميح إلى أية تغيرات فى الجزء الداخلى للشمس (حيث تتكون النيوترينات).

والسؤال الرئيس الذى فرض نفسه حول فهم الأسرار العميقة للشمس هو، هل هذا النوع من السلوك «طبيعى» على مدى تاريخ الشمس الطويل، أم أن نموذج الدورات الشمسية ونشاط بقع الشمس ككل شىء فريد، لم يستمر إلا لبضع مئات أو آلاف من السنوات. لو كنا نعيش فى زمن نشاط غير عادى للشمس، فمن الوارد أن ننظر بجدية إلى تلك الأفكار التى تعزو قلة عدد النيوترينات الشمسية المرصودة حتى الآن، إلى كون الشمس تمر بحالة غير عادية. ولكن لو كانت هناك طريقة ما للعثور على أثر لدورات نشاط شمسى مماثلة حدثت منذ بضعة ملايين أو مئات الملايين من السنوات، فإننا سنضطر عندئذ إلى الاقتناع بأنه من الطبيعى أن تنتج الشمس عددًا من النيوترينات أقل مما تقدره النماذج القياسية. إن الدليل الذى نحتاجه موجود، على نحو صعب التصديق، فى مواد مترسبة ترجع إلى ٦٨٠ مليون عام مضت، فى الجزء المعروف الآن بأستراليا، وهذه المواد حللها الباحثون فى الثمانينيات من القرن العشرين.

السجلُّ فى الصخور

ترجع الصخور التى درسها چورچ وليامز (George Williams) إلى عصر ما قبل الكمبرى المتأخر، أى الفترة بين ٦٥٠ مليون و ٧٠٠ مليون عام مضت. وبالرغم من أن تحديد التاريخ بدقه يتوقف على افتراضات تتعلق بالمقياس الزمنى الچيولوچى، فإننا نقول على سبيل التبسيط إن تلك الصخور كان عمرها ٦٨٠ مليون عام. وعندما ترسبت

هذه الصخور كان العالم آنذاك فى قبضة عصر جليدى قاسٍ، وكان جنوب أستراليا الحالى دائم التجمد، مثل مناطق التجمد الدائم الموجودة فى شمال كندا الآن. وكانت تمتد على حافة منطقة التجمد، من الشمال إلى الجنوب تقريبًا، بحيرة ضحلة طويلة أو بحر داخلى، وتراكم بقاع هذه البحيرة رمل ناعم وجسيمات غرّيَن، ونمت تدريجيًا حتى كونت الصخور المعروفة الآن بتكوين إلاتينا (Elatina Formation). وقد ترتفع درجة الحرارة صيفًا فى منطقة التجمد الدائم غرب البحيرة إلى ما يزيد قليلاً على درجة التجمد، بينما تنخفض فى الشتاء إلى ٣٠°م و ٤٠°م تحت الصفر.

إن الصخور المترسبة فى هذه البحيرة تشكل الآن جزءًا من سلسلة جبال فليندرز (Flinders)، الواقعة غربى إدليد (Adelaide). وقد لاحظ وليامز أثناء عمله الچيولوچى فى المنطقة قطاعًا غير عادى من أحجار الغرين فى تكوين إلاتينا. ويبلغ سمك هذا القطاع حوالى عشرة أمتار من الصخر الرسوبى، وهو يتكون من طبقات أو صفائح رقيقة يتراوح سمك كل منها بين ٠.٠٢ و ٠,٣ مليمتر. ويشبه هذا الشكل الذى كونته تلك الأحزمة الضيقة من الغرين والرمل بدرجة كبيرة نموذج حلقات النمو السنوى فى قطعة كبيرة من جذع إحدى الأشجار. وفى هذه الحالة، كان الشكل المميِّز للأحزمة فى تكوين إلاتينا عبارة عن طبقات دكناء لونها بُنى مائل للاحمرار، تتراوح المسافة بينها ما بين مليمترين وستة عشر مليمترًا، وتفصلها عدة أحزمة من مادة أبهت لونًا، هى الصفائح الضيقة. ويستمر هذا النموذج عبر مساحة تمتد عدة مئات من الأمتار.

ولقد تكونت هذه الترسبات من جسيمات دقيقة تراكمت فى قاع بحيرة قديمة، ويوضح انتظام نمط الخطوط فى الصخور أن هناك تواترًا منتظما بدرجة أو أخرى جُلب للماء من الخارج، وشُحن فى المادة المترسبة. وربما كان هذا التواتر شهريًا مرتبطًا بالمد والجَزْر الذى يحدث فى البحيرة بتأثير القمر، أو سنويًا يرتبط بالذوبان الموسمى للأنهار الجليدية القريبة. وعندما قام وليامز بعدٍّ الطبقات، وجد أن نموذج الترسبات السميكة والرقيقة تكرر تقريبًا كل إحدى عشرة طبقة، مع «دورة مزدوجة» من تناوب دورات الإحدى عشرة طبقة من الترسبات السميكة والرفيعة الشائعة فى تلك المواد المترسبة. لقد كان مدلول ذلك جليًا، وذُكر هذا الاكتشاف فى عام ١٩٨١، كدليل على تأثير الشمس على المناخ فى أواخر عصور ما قبل الكمبرى. واستقر تحديد طبيعة الصفائح الرقيقة على أنها طبقات سنوية من المواد المترسبة؛ الأمر الذى يحدث فى بعض البحيرات حاليًا، وتُعرف بالرقائق الحولية.

وهذا الاكتشاف الذى يفترض أن الإيقاع الشمسى بصورته منذ ٦٨٠ مليون عام مضت هو نفسه الإيقاع الحالى، لم يحظ من علماء الفلك بشكل عام بالترحاب. وأبدى العديد منهم تشككه فيما يتعلق بكيفية ظهور أية «إشارة» «شمسية فى المناخ بمثل هذه القوة، بينما تأثير دورة الشمس على المناخ ضعيف جدًا فى الوقت الحالى. وتساءل البعض عما إذا كانت دورة الإحدى عشرة طبقة المفترضة مرتبطة فعلاً بالمد والجَزْر القمريين، وليس بالشمس. وألا يكون وليامز قد أخطأ فى العد، وأنها اثنتا عشرة طبقة «فى الحقيقة»، أى دورات شهرية؟ لكن أحد كبار علماء الفلك المتخصصين فى الفلك الشمسى، وهو الأسترالى رونالد چيوڤنللى (Ronald Giovanelli)، ساند بحماس بحث وليامز، وساعده للحصول على التمويل اللازم لبرنامج أعده لاستخراج جزء مركزى كامل عبر طبقة الرقائق الحولية البالغ سمكها عشرة أمتار. وذهب وليامز إلى معمل أبحاث ترى - رينج فى أريزونا وهو مسلح بهذه العينة، وحلل نماذج هذه الطبقات وكأنها حلقات شجرة تمامًا، واستخدم مجموعة من التقنيات الإحصائية القوية كان الباحثون فى معمل الأبحاث قد طوروها(*).

قام فى البداية بتحليل ١٣٣٧رقيقة حولية متتالية من قطاع متصل من الجزء المركزى، ثم حلل بعد ذلك ١٥٨٠ دورة «بقع شمسية» متتابعة، تحددها الأحزمة الأكثر قتامة فى الجزء المركزى. وفى عام ١٩٨٥، أعلن أن هناك بالإضافة إلى الدورة الأساسية، والتى تتفاوت فى طولها بين ثمانى سنوات وست عشرة سنة، توجد عدة تواترات أخرى. فعلى سبيل المثال، يتغير طول كل دورة أساسية، طبقًا لعدد الطبقات فى الدورة، عبر دورة أطول طولها ١٣ دورة أساسية. كما يوجد نموذج مميز وواضح يتكرر كل ٢٦ دورة فى سجل إلاتينا.

وأصبح الآن هناك دليل كافٍ لزيادة اهتمام علماء الفلك بالموضوع، وكان من بينهم روبرت براسويل (Robert Bracewell)، الباحث بجامعة ستانفورد، الذى قضى عمره فى دراسة تغيرات بقع الشمس - إن سجل تغيرات بقع الشمس الذى يمكن الاعتماد

(*) تستجيب بعض الأشجار بشكل حساس للتغيرات فى المناخ، بحيث ترسب كل عام حلقات سميكة أو رقيقة نتيجة للتقلبات المناسبة أو غير المناسبة. ويمكن استخدام الأجزاء المركزية المستخرجة من جذوع أشجار حية، وعينات من أشجار أقدم، من خشب ميت، لإعادة بناء نماذج للتغيرات المناخية ترجع إلى الفَىْ عام سابقة فى بعض أجزاء العالم. ولذلك، فإن التقنيات التى كان يحتاجها وليامز لتحليل طبقات الرقائق الحولية كانت جاهزة وفى انتظاره فى أريزونا.

عليه يعود إلى أقل من مائتى عام، غير أن وليامز على ما يبدو وجد سجلاً لتغيرات بقع الشمس يمتد زمنيًا إلى ١٣٣٧ عامًا. لا بأس كيف أثر نشاط الشمس على المناخ منذ ٦٨٠ مليون عام مضت، لقد تعمق براسويل فى تحليل السجل، على افتراض أنه كان بالفعل نموذجًا لنشاط بقع الشمس، وقارنه مع سجله المتواضع تاريخيًا الذى اعتاد عليه.

ووجد أنه يمكنه تفسير نموذج الرقائق الحولية طبقًا لتواترات أساسية كل أحد عشر عامًا وكل ٢٢ عامًا، تم تعديلها بدورتين أطول، تمتدان ٣١٤ عامًا و ٣٥٠ عامًا. ويتغير بانتظام طول دورة «الأحد عشر عامًا» على امتداد الدورة المعدلة ذات الـ ٣٥٠ عامًا، بينما يبدو أن الحجم الذى تبلغه «ذروة بقع الشمس» فى أية دورة من دورات الأحد عشر عامًا يتوقف على وضع الدورة داخل الدورة المعدلة ذات الـ ٣١٤ عامًا. بالطبع لا أمل فى العثور على دورات أطول من ٣٠٠ عام فى السجل التاريخى لبقع الشمس، والذى يقل عمره عن مائتى عام، لكن براسويل وجد طريقة بارعة لاختبار اكتشافاته.

مستخدمًا كل التواترات التى عثر عليها فى الرقائق الحولية المسجلة فى تكون إلاتينا، قام بضبط جهاز الكمبيوتر الخاص به على الحد الأدنى من البقع الشمسية التى حدثت بالفعل فى صيف ١٩٨٦، وقام بتشغيله بشكل «ارتجاعى» بالنسبة للزمن من أجل «التنبؤ» بنموذج نشاط البقع الشمسية عام ١٨٠٠. وحصل على نظير تام تقريبًا للسجلّ الحالى لنشاط الشمس، مع كل الذروات العالية والمنخفضة فى السنوات الصحيحة، والتغير فى طول الدورات نفسها محسوبة بشكل صحيح.

لقد حصل براسويل على أفضل اتفاق بين أية نظرية للتغيرات الشمسية وسجلات حقيقية لبقع الشمس من أزمنة تاريخية، وذلك باستخدام السجل الصخرى «وحده»، الذى يرجع إلى ٦٨٠ مليون عام مضت. وبدا أنه لا مجال للشك فى أن الساعة داخل الشمس منضبطة، وأن الشمس الآن فى الحالة الأساسية نفسها التى كانت عليها منذ ٦٨٠ مليون عام(*).

(*) فى عام ١٩٩٠/ ١٩٩١، كان من المفترض أن يزول أى شك محتمل، وذلك عندما تبلغ الشمس ذروة النشاط ويزيد عدد بقع الشمس على ١٢٥، طبقًا للحسابات التى أجراها براسويل.

الروابط الشمسية

لماذا، إذًا تكون إشارة الشمس قوية لهذه الدرجة فى رقائق إلاتينا الحولية؟ قد لا يكون لذلك أية علاقة بقصتنا الحالية، ولكن ربما من المفيد التوقف قليلاً للتعرف على التفسيرات المطروحة. لقد لاحظ وليامز إحدى النقاط المهمة فى تقريره الأصلى عن الاكتشاف. فالسجلات الچيولوچية توضح أن قوة المجال المغناطيسى للأرض فى أواخر العصر قبل الكمبرى، كانت لا تزيد على ١٠٪ من قوته الحالية. ولم يكن ذلك أمرًا غير عادى، لأن هذا المجال المغناطيسى يتغير على امتداد الدهور، وإن كان لا أحد يعرف لماذا. ولكن أيًا كان السبب، فإنه عندما يكون المجال ضعيفًا يمكن للجسيمات المشحونة القادمة من الشمس (بروتونات وإلكترونات الريح الشمسى) أن تنفذ فى الغلاف الجوى للأرض بعمق أكبر مما يحدث حاليًا، ومن ثَم تؤثر على المناخ.

وهناك تفسير آخر محتمل للارتباط بين نشاط الشمس والمناخ، ففى العصر قبل الكمبرى المتأخر لم تكن الحياة على الأرض قد أطلقت بعد كمية كبيرة من الأكسچين فى الغلاف الجوى (يجب أن نقول بالأحرى الحياة فى «البحر»، لأنه منذ ما يقرب من ٤٢٠ مليون عام مضت لم تكن النباتات قد بدأت تستعمر اليابسة بعد). أما الآن، فإن الأكسچين الموجود فى الغلاف الجوى يمتص الأشعة فوق البنفسجية القادمة من الشمس. ويحدث ذلك أساسًا فى الستراتوسفير(*) على ارتفاع يتراوح بين عشرين إلى ثلاثين كيلومترًا فوق رءوسنا، وينجم عن ذلك أن يكتسب الستراتوسفير طاقة، ويصبح أدفأ من الطبقات العليا لطبقة التروبوسفير، وهى طبقة من الغلاف الجوى تمتد من الأرض إلى الستراتوسفير. ولأن الستراتوسفير أعلى حرارة من التروبوسفير، فإن الحمل الحرارى يتوقف عند قمه التروبوسفير(**)، ويصبح المناخ (الذى يحكمه الحمل الحرارى) مقيدًا بالتروبوسفير. وفى العصر قبل الكمبرى، كان هناك قدر ضئيل من الستراتوسفير، أو ربما لم تكن هذه الطبقة موجودة على الإطلاق، لأن كمية الأكسچين كانت ضئيلة آنذاك أو لم يكن هناك أكسچين ليمتص الأشعة فوق البنفسجية القادمة من الشمس.

(*) الجزء الأعلى من الغلاف الجوى.

(**) يرتفع الهواء الساخن إلى أعلى، لكن هذا لا يحدث إلا إذا كان الهواء فى أعلاه أبرد من الهواء الصاعد.

من المفترض أن يُحْدِث ذلك تأثيرين مهمين على الأقل. أولهما أن المناخ لم يكن مقيدًا بالأرض بذلك الشكل اللصيق، وكان بإمكان أعمدة الحمل الحرارى أن ترتفع فى الغلاف الجوى إلى مسافات أعلى مما عليه حاليًا، أما التأثير الثانى، فخاص بالأشعة فوق البنفسجية القادمة من الشمس والتى تستطيع عمليا النفاذ إلى الأرض، ومن ثَم فإن أية تغيرات فى هذه الأشعة المرتبطة بدورة البقع الشمسية يمكن أن تؤثر بالفعل على درجة الحرارة على سطح الأرض. وبالطبع، فإن أى شىء يؤثر على درجة الحرارة والحمل الحرارى سيؤثر أيضًا على نماذج معدل هطول الأمطار.

ربما يفسر «ذلك» لماذا كان تأثير الشمس على الطقس منذ ٦٨٠ مليوم عام أكبر منه الآن. ومع ذلك، فإن هذا التأثير لم يظهر إلاّ فى المناطق التى تتميز بحساسية شديدة للتغيرات الموسمية فى معدل هطول الأمطار، ونحن محظوظون بشكل غير عادى لأن الآثار المحفوظة لمثل هذه المجموعة من الصخور الرسوبية ظهرت للعيان الآن. ولا يهم أىٌّ التفسيرين هو الصحيح، وإنما حقيقة أن الظروف على الأرض كانت مختلفة تمامًا فى العصر قبل الكمبرى بحيث لا يمكننا عقد مقارنات مع النماذج المناخية الحالية. أثناء تحضير هذا الفصل قدم كيڤن زاهنل (Kevin Zahnle) الذى يعمل بمركز أبحاث ناسا آمس (Nasa's Ames) وچيمس ولكر، الباحث بجامعة ميشجان، تفسيرًا آخر. ولا أستطيع مقاومة إيراده هنا، حتى لو كان لن يضيف إلا القليل إلى محاولتنا لكشف أسرار الشمس.

الرابطة القمرية

لقد ربط زاهنل وولكر بين دورات الإلاتينا ودورات المد والجزر القمرية التى حدثت فى الغلاف الجوى للأرض منذ ٦٨٠ مليون عام مضت. إذ يوضح السجل الصخرى ـ على حد قولهما ـ تأثير «تداخل» قوى بين دورتين، تمتد إحداهما ١٠,٨ عامًا والأخرى ٢٠,٣ عامًا. ويناسب ذلك بالتحديد أطوال الدورات المرتبطة بالشمس والقمر فى العصر قبل الكمبرى.

وكانت إحدى نقاط الانطلاق فى تحليلهما هى البحث الذى قام به بوب كورى (Bob Currie)، الباحث بجامعة نيويورك، والذى أثبت فيه وجود تأثير قمرى على نماذج

هطول الأمطار حول العالم حاليًا. ويرجع ذلك إلى ما يُسمى المد العقدى القمرى فى الغلاف الجوى للأرض، والذى ينشأ من تقدم المستوى المدارى للقمر حول الدائرة الظاهرية لمسيرة الشمس (يتم تحديد مستوى الدائرة الظاهرية لمسيرة الشمس بحركة الشمس الظاهرية عبر النجوم).

يشكل مدار القمر زاوية قدرها خمس درجات مع الدائرة الظاهرية لمسيرة الشمس والتى تكوِّن بدورها زاوية قدرها ٢٣,٥ درجة مع خط الاستواء. وبالتالى، تتراوح درجة ميل مدار القمر، كما يُرى من الأرض، بين ١٨,٥ درجة و ٢٨,٥ درجة؛ مما يؤدى إلى حدوث تغير منتظم فى عمليات المد الناشئة فى الغلاف الجوى (وفى البحر أيضًا، وإن كان ذلك ليس له صلة بقصتنا)، طبقًا لدورة تمتد ١٨,٦ عامًا.

لقد كانت هذه الفترة مختلفة فى الماضى، حين كان القمر أقرب إلى الأرض. وعندما قام علماء الفلك بحساب هذه الدورة وجدوا أنها تبلغ ٢٠,٢ عامًا فى الزمن الذى ترسبت فيه رقائق إلاتينا الحولية، ومن ثَم فإن أى تأثير قمرى على تلك الترسيبات القديمة يجب أن يبدو بوضوح فى هذه الفترة تقريبًا.

كما لا بد أن سلوك الشمس كان مختلفًا قليلاً فى تلك الأزمنة البعيدة. إن دورة النشاط الرئيسة التى تبديها الشمس حاليًا هى دورة بقع الشمس والتى تبلغ مدتها أحد عشر عامًا. وقد درس روبرت نويز (Robert Noyes) وزملاؤه بجامعة هارفارد الدليل على وجود دورات بقع نجمية فى النجوم التى تماثل شمسنا، وتوصلوا إلى أن طول الدورة يتناسب مع فترة دوران النجم. ولقد افترضت النظرية النجمية القياسية أن الشمس كانت تدور بسرعة أكبر عندما كانت أحدث عمرًا، وبالتالى فإن طول دورة نشاط بقع الشمس منذ ٦٨٠ مليون عام يُقدر بحوالى ١٠,٦ عامًا.

وعندما فحص زاهنل وولكر سجل الرقائق الحولية، قررا أن أفضل تفسير للتغيرات يقضى بدورة أساسية مدتها ١٠,٨ عامًا، وهو ما يتفق بدرجة كبيرة مع الحسابات الفلكية لنشاط الشمس فى ذلك الوقت. ولكنهما لم يقبلا افتراض وليامز أن أفضل تفسير للسمة الثانية فى نموذج الرقائق الحولية هو أنها دورة «بقع شمسية مزدوجة».

وعُدلت الدورة الأساسية بشدة بواسطة موجة جيبية تكاد تكون نموذجية يبلغ طولها ٢٨,٤ دورة بقع شمسية. ويمكن تفسير ذلك فى حالة وجود تأثير تداخل(*) يعمل بين الدورة الأساسية ودورة تُماثِل ضعفها «تقريبًا». وهذا الوضع يناسب تمامًا المد العقدى القمرى لتلك الفترة.

غير أن ذلك يترك اللغز الكبير بدون إجابة: إذا كانت تأثيرات الشمس والقمر على المناخ قوية جدًا منذ ٦٨٠ مليون عام، فلماذا أصبحت هذه التأثيرات ضعيفة جدًا فى الوقت الحالى؟ لقد اعتقد زاهنل وولكر أن لديهما الإجابة.

منذ ستمائة مليون عام كانت الأرض نفسها تدور بسرعة أكبر مما هى الآن، وكان اليوم ٢١ ساعة فقط. وحتى الآن، تُحْدث الشمس بشكل يومى مَدًا فى الغلاف الجوى، وذلك ليس بسبب قوة الجاذبية ولكن بفعل الحرارة، حيث يمتص بخار الماء والأوزون الإشعاع الشمسى القادم. وفى العصر قبل الكمبرى، كان هناك بالضرورة تأثير مماثل طالما أن درجة حرارة الغلاف الجوى ترتفع صباحًا وتنخفض ليلاً، حتى وإن كان تركيب الغلاف مختلفًا وكمية الأكسچين أقل. ويطرح ذلك إمكانية ظاهرة أخرى، تُسمى الرنين.

لكل النظم دورة اهتزاز طبيعية، وإذا اهتزت طبقًا لهذه الدورة الطبيعية فإنها تستجيب بذبذبات أكبر عما إذا اهتزت تبعًا لدورة أخرى. ومثال ذلك، مغنى الأوبرا المدرب جيدًا الذى يمكنه أن يؤدى نغمة موسيقية تحطم درجة نقائها كأسًا من الزجاج، لقد استخدم هذا المغنى ظاهرة الرنين بأن أدى النغمة التى تماثل الدورة الطبيعية لذبذبة الكأس (وهى أيضًا النغمة التى تسمعها إذا بللت إصبعك وفَركتها برقة حول حافة كأس زجاجية، وتكون الحيلة أفضل إذا كانت الكأس من البللور الغالى الثمن).. وعندما تداعب أوتار الجيتار، أو الهواء داخل فلوت (أو زجاجة) عند نفخك خلال الفتحة، فإنها ستتذبذب طبقًا لترددها الطبيعى.

(*) ذلك هو بالضبط نوع تأثير التداخل المعتاد بالنسبة للموسيقيين. فعند عزف نغمتين نقيتين وقريبتين جدًا من بعضهما معًا ولكن ليس لحد التطابق التام، فإن تفاعل النغمتين ينتج نغمة ثالثة أكثر عمقًا. وسوف تحصل على التأثير نفسه إذا كان تردد إحدى النغمتين يقرب من ضعف أو ثلاثة أضعاف تردد الأخرى - إذا كانت النغمة الثانية قريبة من النغمة التوافقية للنغمة الأولى. وتتوقف درجة النغمة الناتجة على الفرق بين النغمتين الأصليتين المعزوفتين معًا. وبالطريقة نفسها، يتوقف طول التعديل طويل المدى لرقائق إلاتينا الحولية، وفقًا لزاهنل وولكر، على الفرق بين أطوال الدورتين الأساسيتين. وتحدث آثار التداخل تلك بشكل طبيعى فى العديد من الظروف، وبالتالى فلا عجب إذا كان لهذه التأثيرات عملها على الغلاف الجوى للأرض.

عندما كان اليوم ٢١ ساعة، كان تردد المد اليومى فى الغلاف الجوى هو نفس تردد التذبذب الطبيعى للغلاف، وبالتالى كان هناك رنين مما يجعل تأثير المد أكبر بكثير مما هو عليه الآن. ولأن التأثير «النهارى» للشمس على الغلاف الجوى (وبالتالى على المناخ) كان أكبر فى ذلك الوقت، فإن أية تغيرات فى أشعة الشمس من عام لآخر كانت ستؤثر بشكل غير متناسب على عمليات المد فى الغلاف الجوى آنذاك (مثلاً، إذا تغيرت كمية طاقة الأشعة فوق البنفسجية التى تشعها الشمس على امتداد دورة البقع الشمسية). ولا عجب إذا علمنا أن كمية الطاقة فوق البنفسجية التى تشعها الشمس تتغير فعلاً عبر دورة البقع الشمسية. وفى الزمن الذى ترسبت فيه رقائق إلاتينا الحولية، كان طول اليوم على الأرض أقل من ٢١ ساعة، ثم أصبح أكثر طولاً شيئًا فشيئًا وببطء..

ويبدو أن مَدًا جويًا رنانًا «تقريبًا» حدث منذ ٦٨٠ مليون عام يمكن أن يفسر بشكل جيد جدًا لماذا يبين تكوين إلاتينا مثل هذه «الإشارة» القوية لتأثيرات أصبحت أضعف بكثير الآن. بل ربما كان هذا التأثير أكبر منذ ٦٠٠ مليون عام، عندما كان الرنين تامًا، لكننا لم نكن محظوظين بالقدر الكافى للعثور على رقائق حولية ترجع إلى تلك الفترة لنقوم بتحليلها.

والمهم بشكل خاص فى بحث زاهنل وولكر أنه أوضح كيف أن التغيرات التى حدثت للأرض، وليست تلك التى حدثت فى الشمس، هى التى يمكن أن تفسر السجل الصخرى لأحداث مناخية ترجع إلى ٦٨٠ مليون عام مضت. وفى هذه الصورة، يبدو أن الشمس خلال الـ ٧٠٠ مليون عام الماضية اتبعت منهجًا ثابتًا جدًا، وأن التعديلات الصغيرة جدًا المطلوبة فى طول دورة بقع الشمس، لكى تلائم سجل الرقائق الحولية، تتفق بالكامل مع النموذج القياسى للشمس التى كانت تدور بسرعة أكبر قليلاً فى ذلك الوقت، كما تنطبق هذه التعديلات تمامًا مع عمليات الرصد لنجوم أخرى. إن الشمس لا تمر حاليًا بحالة غير عادية. فهى نجم طبيعى، وتقوم بأشياء طبيعية. ويمكننا بالتالى أن نتوقع بثقة أن محاولات علماء الفلك لسبر أسرار قلب الشمس، سوف تخبرنا عن أشياء وثيقة الصلة بكل تاريخ حياة الشمس، وليس ببعض الظروف الخاصة التى ربما اقتصر عملها على الزمن الذى نشأت فيه الحياة الذكية على الأرض لكى تنظر فى تلك الأسرار. وهناك أخبار طيبة بالفعل ـ فلدى علماء الفلك الآن وسائل لسبر قلب الشمس، وهى تعتمد على تقنيات شبيهة بالطريقة التى يستخدمها علماء الزلازل لدراسة قلب

الأرض بمراقبة الهزات الأرضية. إن الذبذبات فى الغلاف الجوى للأرض قد تفسر العلاقة بين الشمس والمناخ منذ ٦٨٠ مليون عام. لكن يبدو الآن، أن الذبذبات فى الجزء الخارجى من الشمس تكشف ماذا يدور فى قلبها فى الوقت الحالى. وتحمل هذه التقنية الجديدة اسم «هليو سيسمولوچى»، أى علم الزلازل الشمسية ـ الأمر الذى له تأثير مباشر على قضية النيوترينو الشمسى.

الفصل السابع

الشمس المرتجفة

فتحت الشمس المرتجفة قلبها لعلماء الفلك، وكشفت لهم لأول مرة أسرارها الشديدة العمق فى الثمانينيات من القرن العشرين. لكن الاكتشاف الذى جعل سبر أغوار قلب الشمس ممكنًا حدث فى الواقع فى عام ١٩٦٠، قبل سنوات من اصطياد أول نيوترينو شمسى فى صهريج راى دافيز المدفون تحت الأرض. ولمدة عشر سنوات لم يدرك أحد مغزى تلك المشاهدات وعمليات الرصد، ثم احتاج الأمر إلى عشر سنوات أخرى (أو تزيد) لتصميم وتشغيل معدات لمراقبة رجفات الشمس بدقة تكفى لسبر أغوارها الداخلية. ومن المحتمل أن تكون سنوات التسعينيات هى العقد الأعظم لعلم زلازل الشمس، وإن كانت المشاهدات الأولى المفصلة تعطينا معلومات عن تركيب الشمس وتغيرات درجة حرارتها الداخلية، تفوق كل ما عرفناه قبلاً. وقد لا تتوافق هذه الاكتشافات بالكامل مع النموذج القياسى للشمس الذى وضعه العلماء النظريون، لكنها تتفق تمامًا بالفعل مع التعديلات التى أُجريت على النموذج القياسى نتيجة لوجود الويمپات.

بدأت القصة مع اكتشاف رقع صغيرة تتحرك إلى الداخل والخارج فى دورات طولها حوالى خمس دقائق على امتداد سطح الشمس. وحدث الاكتشاف بالصدفة، فى معهد كاليفورنيا للتكنولوچيا، عند استخدام معدات مصممة لدراسة الحركات العشوائية أو الهيولية، للغازات على سطح الشمس، والتى يجعلها الحمل الحرارى تدور على هذا السطح. واستخدم روبرت ليجتون (Robert Leighton) وزملاؤه تقنية دوبلر بعد

تطويرها لزيادة حساسيتها، بحيث يمكنها قياس المواضع المتغيرة لخطوط الطيف فى الضوء القادم من الشمس بدقة كبيرة.

إن كل الغازات الساخنة تُحدِث نماذج مميزة من الخطوط، وهى مثل بصمة الإصبع بالنسبة للطيف الضوئى - واستُخدمت هذه الطريقة فى العشرينيات من القرن العشرين لتحديد هوية العناصر المختلفة فى الغلاف الجوى للشمس، ونسب كل منها. إن الغازات عندما تتحرك جميعها فى وقت واحد نحوك أو بعيدًا عنك، فإن هذه الخطوط تنتقل إلى أطوال موجية مختلفة قليلاً عن تلك المرتبطة بنفس العناصر عندما تكون فى حالة سكون. فعندما تنتقل هذه الخطوط نحو النهاية الحمراء للطيف (ممتدة إلى أطوال موجية أطول)، فإن ذلك يعنى أن الغاز المشع للضوء يتحرك مبتعدًا عنا، أما عندما تنتقل هذه الخطوط نحو النهاية الزرقاء للطيف (منضغطة إلى أطوال موجية أقصر)، فإن ذلك يعنى أن الغاز المشع للضوء يتحرك نحونا. ويمكن تصور دقة المعدات التى استخدمها فريق معهد كاليفورنيا للتكنولوچيا من طبيعة اكتشافاتهم - لقد وجدوا أن رقعًا من الشمس تتذبذب بشكل متقطع، مرتدة إلى الداخل والخارج خمس أو ست مرات فى مدى نصف ساعة تقريبًا، بسرعة ٥٠٠ متر/ ث وبإزاحة كلية تُقدر بحوالى خمسين كليومترًا. وتحرك الذبذبات رقعة من سطح الشمس على امتداد مسافة لا تزيد على ٢٪ من قطر الشمس، وكانت هذه الذبذبات تبدو فى بادئ الأمر وكأنها ظاهرة محصورة، ولا علاقة لها بسلوك الشمس ككل، غير أن ذلك كان خطأ.

رنين كالجرس

ومع بداية السبعينيات من القرن العشرين توصل الكثير من علماء الفلك، كل على حدة، إلى تصور مكَّنهم أولاً من فهم هذه الذبذبات الشمسية، ثم استخدامها بعد ذلك لسبر قلب الشمس. وكان أهم ما فى ذلك التصور إدراك أن السبب فى هذه الحركات المرتدة القصيرة العمر لرقعة من سطح الشمس، لا يرجع إلى تأثير موضعى بحت. بل يمكن تفسير هذه الحركات على نحو أفضل باعتبارها تأثيرًا ناجمًا عن ملايين الذبذبات الأصغر، وهى عبارة عن موجات صوتية حُبست داخل الشمس وجعلت سطحها يرن كالجرس. وما كان يبدو أنه مجموعات من ذبذبات مدتها خمس دقائق كان فى الحقيقية انطباق مئات من الذبذبات ذات الترددات المختلفة ودورات تتراوح بين حوالى ثلاث دقائق وساعة تقريبًا. فى حين تصدر عن الجرس القُرصى نغمة نقية عند

ضربه بالمطرقة الخاصة به، فإن الشمس تتصرف وكأنها جرس قرصى يقع فى قلب عاصفة رملية، حيث تقوم جسيمات صغيرة من الرمل بضربه بشكل متكرر، وتتكون نتيجة لذلك ذبذبات جديدة طوال الوقت بينما تضمحل الذبذبات القديمة. وقد يكون مفجر كل هذا النشاط هو «العواصف» العشوائية التى أشعلتها الحركات الهيولية التى كان ليجتون قد شرع فى دراستها أساسًا، لكن الشمس استجابت لتلك العواصف مثل آلة وترية متعددة الأوتار.

لا توجد أوتار داخل الشمس، لكن هناك العديد من النغمات النقية التى يمكن أن تُحْدث رنينًا بين سطح الشمس وقاع منطقة الحمل الحرارى. وهى موجات صوتية، مثل الموجات الصوتية التى تحدث عند النفخ فى إحدى أنابيب الأرغن (إننى أقصد إحدى أنابيب أرغن الكنيسة التقليدى، بالطبع، وليس الأرغن الإلكترونى!). وتتحد هذه الموجات الصوتية لتهز سطح الشمس بشكل منتظم، وذلك نظرًا للطريقة التى تتغير بها سرعة الصوت عند الأعماق المختلفة داخل الشمس(*).

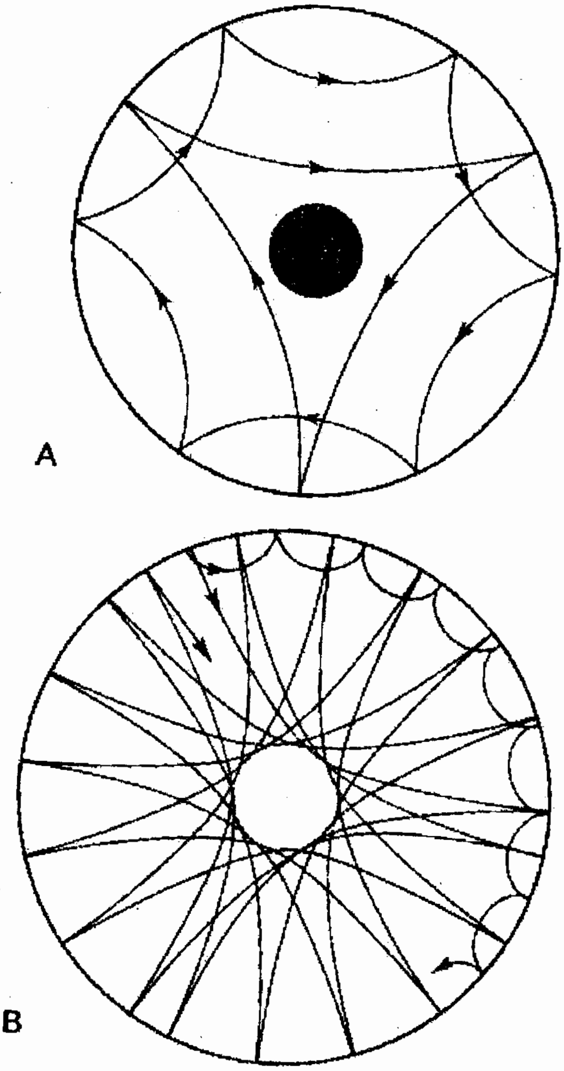
وتعمل هذه الموجات كما يلى: إن سرعة الصوت تزيد كلما اتجهنا من سطح الشمس إلى قاع طبقة الحمل الحرارى، أى إلى الطبقات الأعمق من الشمس، لأن درجة حرارة هذه الطبقات أعلى، ومن المعروف أن سرعة الصوت تزيد كلما ارتفعت درجة حرارة الغازات. ومع ذلك، فإن الموجة الصوتية عندما تنعطف تحت سطح الشمس، وتبدأ فى الانتقال عبر منطقة الحمل الحرارى، يتحرك قاع الموجة بسرعة أكبر من قمتها، وهو ما يجعل الموجة الصوتية المتحركة تنحنى بعيدًا عن قاع منطقة الحمل الحرارى، لتعود مرة أخرى إلى سطح الشمس(**) . ولكن عند السطح لا تستطيع الموجة الصوتية الفرار -

---

(*) تصل سرعة الصوت فى المنطقة المعنية من الشمس إلى ١٥٠ ضعف سرعته فى الغلاف الجوى للأرض، وذلك نظرًا لارتفاع درجة حرارة الشمس، لكن المسافة من مركز الشمس إلى سطحها أكبر بحوالى خمسة ملايين مرة من طول أية آلة نفخ مثل الكلارينيت. وقد يكون المكافئ الشمسى لذبذبة الهواء داخل الكلارينيت موجة يبلغ طول دورتها ثلاثين دقيقة، أى خمسة ملايين ضعف دورة الذبذبة الصوتية، فى الكلارينيت، ولقد أكد دوجلاس جوف، الذى عقد هذا التناظر الدقيق، أن مثل هذه «النغمة» المنخفضة وإن كانت تقع خارج المدى الصوتى الذى تدركه أسماعنا، فإن تسمية تلك الذبذبات الشمسية موجات صوتية يظل صحيحًا، لأن العمليات الفيزيائية التى تدعمها هى نفسها التى تدعم الموجات الصوتية داخل أى كلارينيت على الأرض.

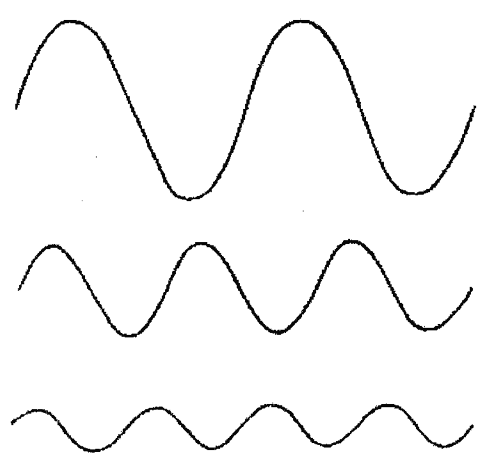
(**) يحدث نفس الشىء للموجات الصوتية فى الغلاف الجوى للأرض. ففى الأيام الحارة، يكون الهواء الملاصق لسطح بحيرة ما أبرد بشكل واضح من الهواء الأعلى منه قليلاً. والموجات الصوتية التى تبدأ فى التحرك إلى أعلى من إحدى ضفتَى البحيرة تنحنى مرتدة إلى أسفل نحو السطح، وقد تحمل معها مثلاً أصوات المتحدثين بوضوح إلى مسافة كبيرة عبر سطح الماء - كنوع من السراب السمعى.

لأن الفضاء خارج الشمس فراغ، ولا يستطيع الصوت الانتقال عبر الفراغ. وبالتالى، فإنها ترتد من السطح، منعكسة مرة أخرى إلى الطبقات الأعمق كما ينعكس الضوء على المرآة. وتتكرر هذه العملية كاملة، فتتحلق الموجة الصوتية حول الشمس، وتغوص بشكل متكرر فى منطقة الحمل الحرارى، لتتحنى عائدة ومنعكسة على السطح. (شكل ١ - ٧).



شكل (١ ـ ٧) أ، ب تنحنى الموجات الصوتية المتحركة داخل الشمس عند مرورها عبر الأجزاء الداخلية الساخنة، وتنعكس عند اصطدامها بالسطح من أسفل. وبالتالى، يمكن أن يتكون نموذج من الموجات المستقرة داخل الشمس، كما يتضح من هذين الرسمين التخطيطيين. وأينما تلمس هذه الموجات المستقرة سطح الشمس، فإنها تحدث ذبذبة منتظمة يمكن قياسها من الأرض.

يتوقف كل من العمق الذى تنفذ إليه الموجة والمسافة التى تقطعها حول الشمس فى كل وثبة بين الانعكاسات على السطح، على طولها الموجى. فكثير من الموجات يرتد إلى داخل الشمس ويضمحل دون إسهام فى الذبذبات المنتظمة التى اكتُشفت فى بداية الستينيات من القرن العشرين. لكن بالنسبة لبعض الموجات، تكون المسافة بين الارتدادات مناسبة تمامًا للحصول على عدد صحيح من الوثبات تنطبق فى دائرة كاملة حول الشمس. وقد ترتد الموجة ثلاث، أو ست أو أى عدد آخر من المرات أثناء رحلاتها، ولكنها عندما تدور وتدور حول الشمس تلمس السطح دائمًا فى نفس الأماكن الثلاثة، أو الستة، أو أى عدد كان. وبالتالى لا تدفع الموجة تلك الرقع الخاصة من سطح الشمس إلى الداخل والخارج مرة واحدة؛ ولكنها تدفعها فى كل مرة تمر حول الشمس. ويُعرف النموذج الذى تكونه باسم الموجة المستقرة (شكل ٢ ـ ٧)، وهى مكافئة تمامًا للموجات المستقرة التى تجعل وتر الجيتار يتذبذب عند مداعبته محدثًا نغمة نقية، وهو ما ينطبق أيضًا على عمود الهواء داخل أنبوب أرغن، ويستطيع الفيزيائى، بتحليله للنغمات التى يصدرها أنبوب أرغن، أن يخبرك بأبعاد ذلك الأنبوب دون أن يكون قد رآه قط. وبالمثل، فإن تحليل «النغمات» التى تحدثها الموجات الصوتية المتنقلة حول الشمس، يمكِّن عالم الفيزياء الفلكية من معرفة الظروف داخل الشمس، دون أن يرى قط ما تحت السطح.



شكل (٢ ـ ٧) يوضح الشكل التخطيطى هنا ثلاثة نماذج للموجة المستقرة، وهى مثل موجات وتر الجيتار عند مداعبته أو عمود الهواء المتذبذب داخل أنبوب أرغن، هذه الموجات الثلاث جزء من نفس عائلة النغمات التوافقية، وتنطبق كل منها على الحيز نفسه ـ الموجة الأولى ذات قمتين وقرارين، والموجة الثانية لها ثلاث قمم وثلاثة قرارات، أما الموجة الثالثة فلها أربع قمم وأربعة قرارات، ويستطيع الفيزيائى أن يحدد حجم أنبوب الأرغن الذى أصدر هذه النغمات، وذلك بتحليلها. وباستخدام التقنية نفسها، يستطيع علماء الفيزياء الفلكية أن يعرفوا الكثير عن الظروف داخل الشمس.

قد يكون الموقف أكثر تعقيداً من ذلك، لأن «التجويف» داخل الشمس ثلاثى الأبعاد وليس أنبوبًا مستقيمًا أحادى البعد، غير أن أُسس التحليل هى نفسها تمامًا.

تناغم دقيق

أكدت عملية رصد متطورة خلال السبعينيات من القرن العشرين، أن الشمس «ترن» بالفعل بهذه الطريقة. فى أول الأمر، وجد علماء الفلك أنه يمكن مشاهدة الذبذبات التى دورتها خمس دقائق حتى فى ظل السطوع الكلى لشمس، وذلك فى شكل تغير بالغ الصغر فى الضوء «المتكامل»، كما يسمونه. إنهم بذلك فى الحقيقة، يتعاملون مع الشمس كما لو كانت نجمًا بعيدًا، بالنظر الى سطوعها الكلى، وليس إلى التغيرات فى درجة السطوع من مكان لآخر على امتداد السطح. وبإدخال تحسينات بعد ذلك على دراساتهم فى مجال التحليل الطيفى، تمكنوا من إثبات أن كل رقعة شمسية نراها تتحرك إلى الداخل والخارج فى دورة مدتها خمس دقائق، هى فى الحقيقة تتعرض إلى دفع عدد هائل من موجات مستقرة أصغر بكثير.

إن قياس الطريقة التى تحرك بها مثل هذه المنطقة الصغيرة من سطح الشمس إلى أعلى وإلى أسفل خمس أو ست مرات كل نصف ساعة على امتداد مسافة تُقدر ببضع عشرات الكيلومترات، لهو أمر يثير الدهشة والإعجاب. غير أن استخدام تقنية تُعرف باسم تحليل فورييه، يمكِّن من تفكيك هذه الحركة إلى الأجزاء المكوِّنة لها. ومرة أخرى، هناك تناظُر موسيقى ملائم. فعلى سبيل المثال، تتطابق أعمق نغمة يمكن أن تصدر عن أنبوب أرغن مع صوت ذى طول موجى يسمح لموجة واحدة فقط أن تنطبق مع طول الأنبوب. وتُعتبر هذه النغمة هى النغمة الأساسية لهذا الأنبوب بالذات. ويتكون الأرغن من أنابيب ذات أطوال متعددة بحيث يمكنه لعب نغمات مختلفة. غير أن هناك طريقة أخرى للحصول على نغمات مختلفة من أنبوب واحد فقط.

إن الطول الموجى للنغمة الأساسية يساوى طول الأنبوب. وتلك هى النغمة «الطبيعية» التى يُصدِّرها الأنبوب، والتى تحصل عليها بمجرد النفخ عبر نهاية الأنبوب وجَعْل الهواء داخله يرن (والنفخ عبر فتحة زجاجة فارغة يُحْدث الحيلة نفسها). ولكن يمكنك الحصول على موجة طولها الموجى نصف طول الأنبوب بحيث تتكرر مرتين بداخله، وعلى موجة أخرى طولها الموجى ربع هذا الطول بحيث تشكل أربع موجات داخل الأنبوب، وهكذا. وتُعرف هذه الموجات الأقصر التى تناسب الأنبوب أيضًا، باسم النغمات

التوافقية، وهى تناظر على نحو ملائم النغمات الأعلى المرتبطة بالنغمة الاساسية. وحتى إذا حاول عازف أرغن أن يعزف نغمة نقية ـ الأساسية ـ فإن بعض ذبذبات الهواء فى الأنبوب سوف تعطى نغمات توافقية، وهو ما يساعد على إعطاء الأنواع المختلفة من آلات النفخ تركيبات صوتية مختلفة، حتى وإن كانت هذه الآلات تعزف النغمة نفسها.

وباستخدام تحليل فوربيه، يستطيع أى فيزيائى حل ذلك التعقيد المكون من النغمات المتداخلة والمتراكبة، ويخبرك بالضبط ما النغمات النقية والنغمات التوافقية التى تجمعت فى الأنبوب لإنتاج الصوت الثرىّ الذى تسمعه. وباستخدام التقنية نفسها بالضبط يمكن تحليل نموذج الذبذبات التى تم رصدها على سطح الشمس إلى الموجات الفردية المستقرة التى تجمعت لإحداث التغير المرصود. ورغم أنه لا يمكن إحصاء عدد الموجات الفردية المستقرة بدقة، إلاَّ أن الدليل الإحصائى يبين أن هناك بالفعل عشرات الملايين من الذبذبات المنفصلة ـ «نغمات منفصلة» ـ تتداخل فيما بينها لإنتاج التأثيرات المرصودة (تتحد فى بعض الأماكن وتلغى بعضها البعض فى أماكن أخرى). وتحرك كل ذبذبة فردية سطح الشمس إلى الداخل والخارج على امتداد بضع عشرات الأمتار تقريبًا، بسرعات لا تزيد على بضع عشرات من السنتيمترات فى الثانية (قارن ذلك مع قطر الشمس، الذى يُقدر بحوالى «مليون» كيلومتر)، لكن يمكن لأية موجة مستقرة أن تستمر لعدة أيام، وتحرك على الدوام الرقعة نفسها من سطح الشمس إلى الداخل والخارج، ويساعد طول عمر هذه الموجات الراصدين على جمع معلومات كافية تجعل تحليل فوربيه فعالاً. إن التأثير المشترك للملايين من هذه الذبذبات المتناهية الصغر، هو الذى يحدث نبضات الذبذبة الأكبر قصيرة الأجل التى لوحظت أول مرة فى بداية الستينيات من القرن العشرين.

وهناك طريقة أخرى تستطيع بها إدراك مدى دقة وبراعة عملية التعديل والتطوير الدقيقة التى أُدخلت على تقنية التحليل الطيفى. تذكَّر، أن كل شىء يتوقف على الطريقة التى تغير بها خطوط طيف ضوء الشمس موقعها ذهابًا وإيابًا فى مدى صغير من الأطوال الموجية، مثل منطقة الغاز التى رُصدت تتحرك نحو أداة التحليل الطيفى أو بعيدًا عنها، وهو ما يكافئ حدوث تغير فى لون الضوء. عندما تتحرك نحونا تلك الرقعة التى ندرسها من سطح الشمس، فإن الطول الموجى الخاص للضوء (لون) الذى ينبعث من سطح الشمس يصبح أقصر (أكثر زُرقة)، أما عندما تتحرك رقعة سطح الشمس

بعيدًا عنا فإن الطول الموجى للضوء المنبعث يصبح أطول (أكثر احمرارًا). وبما أن الأرض تدور، فإن أداة الرصد ذاتها تنتقل، على مدار اليوم، حيث تتجه أولاً نحو الشمس ثم تبتعد عنها، بسرعات تغطى مدًى يُقدر بحوالى ٨٠٠ متر/ ث ـ ولما كانت هذه الدورة منتظمة ومعروفة فمن السهل السماح بها فى الحسابات.

لكن حتى هذا التأثير على الأطوال الموجية للضوء ـ الألوان ـ التى تم قياسها صغير. فإن سرعة الضوء نفسها تبلغ ثلاثمائة «مليون» متر فى الثانية. إذا كنت تقود سيارة بسرعة كافية نحو إشارة مرور حمراء، يمكنك، مبدئيًا تغيير لون الضوء الذى تريد أن تراه إلى اللون الأخضر، وذلك بنقل موضع الضوء نحو الأزرق (فى الجزء المرئى من ألوان الطيف يقع الأخضر بعد منتصف المسافة بين الأحمر والأزرق بقليل). لكن لكى تتمكن من تحقيق هذه الحيلة، يجب أن تتحرك بسرعة تساوى ثلث سرعة الضوء، أى حوالى مائة مليون متر فى الثانية. فى حين أن التأثيرات التى قِيسَت على سطح الشمس توازى حركات تُقدر سرعتها بحوالى عشرة «سنتيمترات» فى الثانية، أى سرعة السير فى نزهة لطيفة، فهو تأثير أدق مليار مرة. ربما، لا يثير الدهشة أنه بالرغم من ذلك فإن ذبذبات الشمس رُصدت أول مرة فى بداية الستينيات من القرن العشرين، ولكن لم يبدأ فهمها وتحليلها بالتفصيل إلا فى السبعينيات، وفى الثمانينيات فقط، بدأت دقة وبراعة المعلومات التى تحتويها تقدم رؤى جديدة لما يحدث داخل الشمس، لكن تلك الرؤى كانت تستحق انتظارها.

النتائج الأولى

يتوقف العمق الذى تدور فيه الموجة الصوتية المتنقلة قبل أن تنحنى عائدة نحو سطح الشمس، على مدى السرعة التى تزداد بها سرعة الصوت كلما انتقلت الموجة إلى مسافات أعمق داخل الشمس. ويتوقف ذلك بدوره على طريقة ازدياد درجة الحرارة. وبالتالى، يستطيع علماء الزلازل الشمسية تكوين صورة جانبية لدرجة حرارة الطبقات الخارجية للشمس ـ صورة دقيقة لكيفية زيادة درجة الحرارة كلما تحركت تحت السطح لمسافات أعمق، وذلك بتحليل الموجات المستقرة المختلفة (أشكال الذبذبة المختلفة) التى تسبر الشمس عند أعماق مختلفة (شكل ١ ـ ٧). ومن ناحية أخرى، فإن سرعة الصوت تتوقف أيضًا على التركيب الصحيح للشمس ـ وما إذا كانت تحتوى على ٢٥٪ من الهليوم أم ٣٠٪ مثلاً أو حتى ٢٠٪.

قبل تطور علم الزلازل الشمسية لم تكن هناك وسيلة مباشرة لقياس درجات الحرارة داخل الشمس، وكان يُستدل عليها من النماذج التى يضعها الكمبيوتر باستخدام الفيزياء القياسية. أما الآن، فيمكن اختبار صحة هذه النماذج. وكان من الممكن استخدام النموذج القياسى للشمس، الذى طوره علماء الفيزياء الفلكية قبل مجىء علم الزلازل الشمسية فى وضع تنبؤات عن ترددات الذبذبات الصوتية التى اكتُشفت الآن وحلَّلها العلماء (كان يمكن أن يتم ذلك فعلاً «قبل» اكتشاف الذبذبات، لكن لم يتصور أحد أن مثل هذه الأشياء الدقيقة يمكن أن تصبح بالفعل جزءا من الدراسات الرصدية للشمس). إن الترددات التى تنبأ بها النموذج القياسى أعلى قليلاً من الترددات التى رُصدت بالفعل، لكن يمكن أن تتلاءم تنبؤات النموذج مع القياسات المرصودة إذا تمددت منطقة الحمل الحرارى فى الجزء الخارجى من الشمس إلى عمق أكبر قليلاً مما اعتقده علماء الفيزياء الفلكية، أى إلى عمق مائتى ألف كيلومتر تقريبًا، أى حوالى ٣٠٪ من الطريق بين سطح الشمس ومركزها. وبمجرد إجراء هذا التعديل، يصبح النموذج القياسى متفقًا مع المشاهدات، شريطة أن تحتوى، منطقة الحمل الحرارى الخارجية من الشمس على حوالى ٢٥٪ من الهليوم، وهى النسبة المطلوبة بالضبط طبقًا لنموذج قياسى آخر للفيزياء الفلكية، وهو النموذج الذى يصف الانفجار العظيم الذى وُلد منه الكون.

لقد أتاح علم الزلازل الشمسية لعلماء الفيزياء الفلكية أن يعدلوا، فى الحال، نموذجهم القياسى للشمس ويحسنوه؛ لكن هذه التعديلات الدقيقة والبارعة لا تغير طريقة حساب هذا النموذج القياسى لدرجة الحرارة فى قلب الشمس، وبالتالى ظلت مشكلة النيوترينو الشمسى قائمة بكامل قوتها.

بل يمكن القول بأن دراسة الذبذبات الشمسية جعلت مشكلة النيوترينات الشمسية تبدو، بشكل ما، أسوأ. وذلك لأن ما قدمته الذبذبات من تصور لتركيب الشمس سحب البساط من تحت أقدام بعض الأفكار التى قُدمت لسنوات عديدة «لتفسير» ندرة النيوترينات الشمسية. من السهل أن يحلم العلماء بحلول المشكلة النيوترينو من نوع حلول حفلات الكوكتيل، طالما أن ذلك لا تعوقه عمليات رصد فعلية لداخل الشمس الذى كان آنذاك منطقة مجهولة، غير أن الأمر يصبح أصعب بالنسبة لهذه الأفكار الغريبة عندما نبدأ فى اكتشاف كيفية عمل المناطق الداخلية من الشمس فى الواقع. وسأعطى مثالا واحدًا فقط.

يعتمد ذلك «التفسير» الخاص لمشكلة النيوترنيو على إمكانية أن تكون بعض المادة الموجودة فى قلب الشمس، والمعالجة بواسطة تفاعلات، الاندماج النووى، قد اختلطت وهى فى طريقها إلى الخارج بحيث لوثت الطبقات الخارجية بمادة معالجة (نوع من الرماد النووى)، وغيرت هذه المادة من تركيب قلب الشمس، حيث سحبت إليه من أعلى مادة غير معالجة (وقود زائد). ويمكن ترتيب مثل هذا الاختلاط للحصول على نموذج حاسوبى يتنبأ بإنتاج منخفض من النيوترينات الشمسية ـ لكن ذلك يؤثر أيضًا على طريقة تغير سرعة الصوت داخل الشمس تبعًا للعمق. وهذا النوع من التغيير الناجم عن هذا الخليط يمكن حاليًا أن يحسمه علم الزلازل الشمسية بأن يعلن أنه غير وارد، وأن علماء الفيزياء الفلكية بحثوا عنه، ولكنهم لم يجدوه.

إن النتائج الأولى لعلم الزلازل الشمسية لم تحسم فقط أمر هذا «الحل» الفيزيائى الفلكى الخاص لمشكله النيوترينو، ولكنها حسمت عمليًا كل المحاولات الأخرى للالتفاف حول المشكلة بمجرد معارضة النموذج القياسى الذى وضعته الفيزياء الفلكية. وتوضح طريقة ارتجاف الشمس أن حل المشكلة لا يكمن فقط فى تعديل الفيزياء الفلكية، ولكن يجب أن يتضمن أيضًا فيزياء جسيمات «جديدة». وبالفعل، حان الوقت لعودة الويمپ مرة أخرى إلى القصة. أولاً، يمكن أن تتأكد قوة فرع العلم الجديد، علم الزلازل الشمسية، نتيجة للطريقة التى حل بها نزاعًا استمر لعقود، وهو النزاع الخاص بطريقة دوران الشمس.

لقد عرف جاليليو أن الشمس تدور، لأنه اكتشف نقطًا دكناء على سطحها وراقب بعضها يتحرك نتيجة لدوران الشمس. ودرس علماء الفلك المحدثون دوران الشمس بالطريقة نفسها. ولأن الشمس ليست جسمًا صلبًا مثل الأرض، وإنما جسم سائل، فإنها لا تدور كلها بالسرعة نفسها ـ يستغرق الغاز عند خط الاستواء حوالى ٢٥ يومًا ليدور مرة واحدة، بينما تدور المناطق القطبية مرة كل ثلاثين يومًا ـ والمقصود بالطبع بسرعة الدوران هى السرعة عند السطح فقط ـ فالشمس قد تدور أسرع (أو أبطأ) فى الداخل. ولقد أثارت هذه الإمكانية فضول واهتمام علماء الفلك الذين درسوا طريقة دوران الكوكب عطارد فى مداره (وهو أقرب كوكب للشمس).

إن المدارات التى تتبعها الكواكب حول الشمس ليست دوائر ولكنها قَطْع ناقص، حيث تكون الشمس عند إحدى بؤرتَىْ هذا القطع الناقص.

لقد كان ذلك معروفًا منذ بداية القرن السابع عشر بفضل أبحاث يوهانز كپلر (Johannes Kepler) الرائدة. لكن أدرك علماء الفلك فى القرن التاسع عشر أنه حتى مع الأخذ فى الاعتبار كل العوامل المعروفة، مثل جذب قوة جاذبية كل كوكب من الكواكب الأخرى، فإن مدار عطارد يظل معقدًا بعض الشىء، فبدلاً من أن يرسم الكوكب دائمًا نفس القَطْع الناقص، يغير المدار اتجاهه بانحراف قليل، ويدور على محور حول البؤرة اللصيقة بالشمس، فى كل مرة يدور فيها الكوكب حولها. إن تأثير ذلك ضئيل جدًا، حيث لا يتعدى مجموع تغيير الاتجاه ٤٣ ثانية من قوس فى كل قرن. إلا أنه تغير حقيقى، ولم يتمكن أحد من تفسيره حتى العقد الثانى من القرن العشرين، عندما قدم ألبرت آينشتاين نظرية النسبية العامة. وكان من بين الانتصارات العديدة لهذه النظرية أنها فسرت «بدقة» التغير فى مدار عطارد عبر القرون (النظرية النسبية العامة هى نظرية لقوة الجاذبية تختلف اختلافًا دقيقًا عن نظرية نيوتن للجاذبية، والتى اعتمدت عليها كافة حسابات المدارات السابقة).

واستجابة لرغبة جديرة بالثناء لاختبار النسبية العامة لأقصى حد، أشار حديثًا بعض علماء الفيزياء الفلكية إلى طريقة أخرى تجعل مدار عطارد يغير من اتجاهه بالشكل الذى رُصد. فإذا كان قلب الشمس يدور بسرعة كبيرة للغاية وينتأ نحو الخارج نتيجة لذلك، فإن تأثير قوة جاذبية هذا النتوء سيجعل مدار عطارد يغير أيضًا من اتجاهه حول الشمس. وإذا كان ذلك هو ما حدث بالفعل، فإنه لا حاجة بعد للنسبية العامة لتفسير الظاهرة!

لم يحتدم الجدل حول ذلك فى أروقة العلم - فهناك كمٌّ ضخم من الأدلة الأخرى على صحة النسبية العامة. لكن ظلت فكرة أن قلب الشمس يدور بسرعة أكبر احتمالاً مزعجًا حتى نهاية السبعينيات من القرن العشرين. لقد أدرك علماء الفيزياء الفلكية عندئذ أن مثل هذا النموذج الشمسى ذى القلب الناتئ الذى يدور بسرعة أكبر، قد يؤثر أيضًا على شكل الذبذبات فى الشمس. وقد أوضحت مقارنة عمليات الرصد مع الحسابات المناسبة للنموذج، عدم وجود أية إشارة لمثل هذا التأثير. وهنا طرح العلماء فرضًا آخر، وهو احتمال أن تكون الشمس تدور بالفعل بسرعة أبطأ قليلاً فى داخلها عن خارجها. (وهو ما لم يتنبأ به أحد على ما يبدو). إن النسبية العامة لا غنًى عنها لتفسير ما يحدث لمدار عطارد، ولكل الأشياء الأخرى التى فسرتها. وبما أن النسبية

العامة رسخت كنظرية «جيدة»، فإن دقة استخدام الذبذبات الشمسية كوسيلة لسَبْر داخل الشمس قد تأكدت بحقيقة أن التركيب الداخلى الذى تصفه الذبذبات يتفق مع التركيب الذى توقعناه إذا كان تغير اتجاه مدار عطارد ناتجًا بالفعل عن تأثيرات نسبية. إذًا، ما الذى «يمكن» أن تقوله لنا هذه التقنية الجديدة لعلم الزلازل الشمسية عن محاولات حل مشكلة النيوترينو؟

التوصل إلى اتفاق

لقد ظهرت الإجابة للعيان كنتيجة لزيارة قام بها چون فولكنر لمعهد تاتا فى بومباى فى شهرَىْ نوفمبر وديسمبر ١٩٨٥. فقد التقى هناك الباحث الهندىماينك ڤاهيا (Mayank Vahia) الذى كان مهتمًا بمشكلة النيوترينو الشمسى، وسأل فولكنر كيف يمكن أن يؤثر وجود الويمپات فى النماذج على الذبذبات المتوقعة للشمس؟ لكن فى ذلك الوقت لم يكن فولكنر يملك إجابة، ولذلك خططا معًا لحضور اجتماع الاتحاد الدولى للفلك الذى عُقد فى نيودلهى فى نهاية نوفمبر. وهناك، كان فولكنر يعرف أن دوجلاس جوخ، الباحث بجامعة كمبريدج، سيلقى محاضرة عن التغيرات الشمسية، وكانت فرصة ذهبية لاكتشاف ما يريدان.

فتح حديث جوخ عيون فولكنر وڤاهيا على حقيقة وجود مشكلة نبض شمسى كما توجد مشكلة نيوترينو شمسى. ويتعلق الأمر بمرحلة من القياسات أكثر دقة من تلك التى سبق لى مناقشتها حتى الآن، فهى لا تتناول دورات ذبذبة الموجات الصوتية داخل الشمس التى تسبب الذبذبات ذات دورة الدقائق الخمس، ولكنها تتعامل مع «الفارق بين» دورات تذبذب موجات صوتية ذات اتصال وثيق بها. إن الموجات التى وصفتُها حتى الآن تُعرف تقنيًا بموجات ضغط (P - nodes). وهى تكافئ تمامًا نبض الموجات الصوتية التى تجعل كتلة الماء فى حوض الاستحمام تموج إذا هويتَ بقوة راحة يدك على سطح الماء. إن بعض موجات الضغط التى أزعجت سطح الشمس تمر مباشرة عبر قلب الشمس، وبالتالى يمكنك أن تتوقع أنها ستكون مفيدة فى دراسة الظروف فى قلب الشمس. ونتيجة للارتفاع الشديد لدرجة حرارة القلب تكون سرعة الصوت فيه أيضًا كبيرة جدًا، وتمر موجات الضغط عبر القلب بسرعة عالية؛ مما لا يتيح لها الوقت لأن تتأثر إلا بطرق دقيقة جدًا. وتتضمن إحدى هذه الطرق الدقيقة، فرق تردد التذبذب بين الموجات الصوتية ذات الدورة المتماثلة تقريبًا - أى «فجوة التردد بين

موجات الضغط المتجاورة». لقد كان ذلك هو الجزء الرئيس من حديث جوخ الذى شد انتباه فولكنر.

وذكر جوخ أن النموذج القياسى للشمس (حتى بعد التعديل الدقيق الذى ذُكر سابقًا) لا «يتنبأ» فقط بعدد كبير جدًا من النيوترينات الشمسية، ولكنه يتنبأ أيضًا بفجوة تردد بين موجات الضغط تلك تزيد بنسبة ١٠٪ عن القيمة التى كشف عنها علم الزلازل الشمسية. إن ذلك لا يبدو سيئًا فى حد ذاته. لكن عندما أشار جوخ فى حديثه لجمهور الحاضرين فى نيودلهى، إلى أن كل النماذج الشمسية الموجودة والتى «تحل» مشكلة النيوترينو بجعل قلب الشمس أبرد بنسبة ١٠٪، جعلت الموقف أكثر سوءًا (النماذج ذات المزيج الداخلى، التى سبق لى أن ذكرتها) ـ لأن فجوة التردد بالنسبة لهذه النماذج تكون كبيرة جدًا بحوالى ٥٠٪.

وعلى الفور سأل فولكنر ما الذى حدث مع نماذج الويمب. رد جوخ بأنه لم يُجْرِ الحسابات على تلك النماذج ولا يعرف الإجابة، ولكن طالما أن الويمبات أيضًا تجعل مركز الشمس أبرد فإنه توقع أنها ستجعل مشكلة التذبذب كذلك أسوأ. لكن فولكنر فكر مليًا فى المشكلة، وأصبح مقتنعًا أن نموذج الويمب يختلف عن كل النماذج الأخرى ذات القلب الأبرد فى نقطة حاسمة، ومن ثَم فسواء أكان «حجم» التعديل فى فجوة التردد هو «الحجم» المناسب أم لا، فإن هذا النموذج يسير فى «الاتجاه» السليم، مقللاً بذلك التعارض الذى أوضحه جوخ بشكل بارز. ومع ذلك، ففى النماذج المختلطة تكون سرعة الصوت «أعلى» فى مركز الشمس، رغم درجة الحرارة الأكثر انخفاضًا، وذلك بسبب الاختلاف فى التركيب مقارنة بالنماذج القياسية، بينما تكون سرعة الصوت أكثر «انخفاضًا» فى نموذج الويمب، لأن درجة الحرارة أقل والتركيب أساسًا هو نفس تركيب النموذج القياسى. ولكن هل يمكن أن يكون التأثير كبيرًا بما فيه الكفاية للقيام بالمهمة؟

عندما تعقب فولكنر، جوخ فى المساء التالى لمحاضرته، أثارت الفكرة اهتمامه ووجدها تستحق الفحص الدقيق، لكن متى؟ وأين؟ كان جوخ متوجهًا بالفعل إلى معهد تاتا لمدة أسبوعين، وفولكنر سيكون هناك أيضًا فى تلك الفترة. فوجد الاثنان أنها فرصة ممتازة لا ينبغى إهدارها.

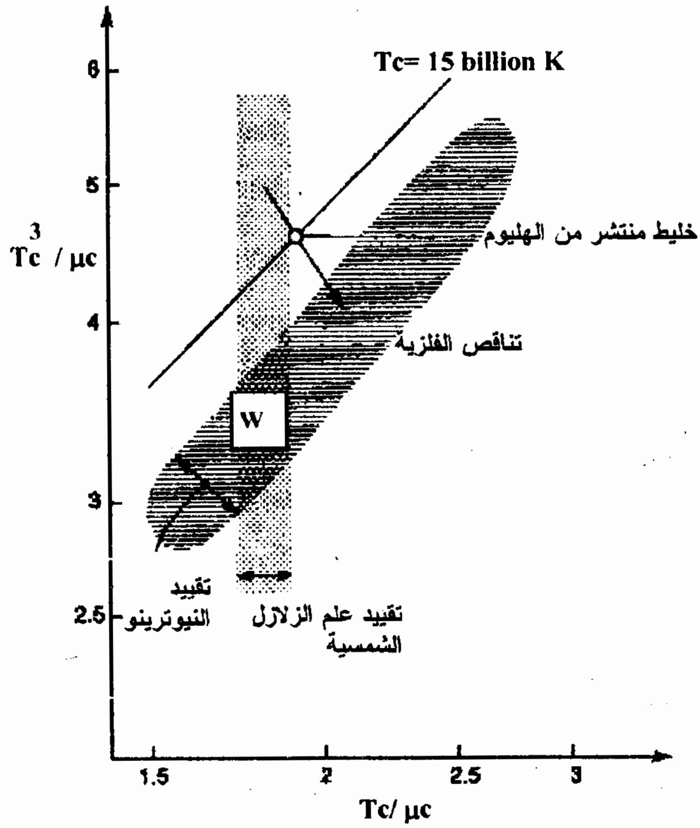
وشهد معهد تاتا طوال خمسة أيام عملاً مكثفًا، قام به الصديقان القديمان منذ أيام كمبريدج، ومعهما زميلهما الجديد ڤاهيا، وأثبت الثلاثة أن التغير فى التركيب الداخلى

للشمس الناجم عن وجود عدد كافٍ من الويمپات لحل مشكلة النيوترينو الشمسى يؤدى إلى تعديل دورات الذبذبات، بحيث تكون فجوة التردد بين موجات الضغط التى تنبأ بها النموذج متوافقة تمامًا مع الفجوة التى قاسها علماء علم الزلازل الشمسية. ويوضح شكل (٣ ـ ٧) كيف أن نموذج الويمپ يتفق مع القيود الرصدية ـ وكيف أن كل «الحلول» الفيزيوفلكية الأخرى، لمشكلة النيوترينو تجعل مشكلة التذبذب أسوأ. وفى عصر الكمپيوتر، كان فولكنر مبتهجًا للغاية وهو يوضح كيف أن الحسابات تمت بالطريقة القديمة، باستخدام القلم والورق ـ ولأنه ترك كل بياناته فى سانتاكروز، كان عليهم أن يقرءوا الأرقام التى تطلَّبتها حساباتهم من الرسوم البيانية المنشورة فى النسخة المطبوعة للأبحاث المبكرة التى شارك فى إعدادها عن الويمپ (حيث تحتفظ مكتبة معهد تاتا بأعداد مجلة الفيزياء الفلكية). وفى ديسمبر ١٩٨٥، أنهى فولكنر وجوخ وڤاهيا بحثهم المشترك، ووصلت نسخة منه إلى مجلة «نيتشر»، فى لندن، فى آخر أيام ذلك الشهر. وبعث فولكنر بنسخة أخرى إلى تلميذه السابق چيليلند فى بولدر ـ وعندما عاد إلى كاليفورنيا، علم أن چيليلند كان قد فكر بالفعل (وأجرى أبحاثًا) طبقًا للخطوط نفسها.

وفى هذه المرة هزم القلمُ والورقُ الكمپيوتر. فقد استخدم چيليلند وزملاؤه فى بولدر أجهزة كمپيوتر ضخمة لاستنباط ورسم العديد من أشكال التذبذب المختلفة والظروف الفيزيائية المطلوبة لجعل الذبذبات النظرية تتوافق مع مشاهدات الشمس. وتوصلوا إلى الاجابة نفسها ـ إن وجود الكمية الصحيحة من الويمپات يجعل النظرية تتفق مع المشاهدة، ولكن اتضح أن الطريقتين تكمل إحداهما الأخرى.

لقد بدأت مجموعة الباحثين فى بولدر بالذبذبات، واختارت تلك التى تتوافق مع المشاهدات وعادت مرة أخرى لتكتشف الظروف فى قلب الشمس التى تخبرهم بها تلك الذبذبات، أما المجموعة الأخرى فى معهد تاتا فلقد بدأت بالصورة الجانبية لدرجة الحرارة التى تتوافق مع نموذج الويمپ، وقاموا بحساب نوع الذبذبات التى يمكن أن تنتجها، ووجدوا أن تلك الذبذبات تتوافق مع المشاهدات. وكان المفتاح فى كل حالة هو أن وجود الويمپات فى النموذج يخفض درجة الحرارة فى قلب الشمس دون حدوث تغيير فى تركيبه، أى دون اختلاط مكونات قلب الشمس بمكونات من خارجه، وبالتالى انخفضت سرعة الصوت أيضًا. ولأن تناول كل فريق كان مختلفًا، أعد فريق بولدر بحثه

على عجل لكى يُنشر فى مجلة «نيتشر» أيضًا، بينما اتفق فولكنر وزملاؤه أن ينتظروا، بحيث ظهر البحثان جنبًا إلى جنب فى عدد ١٥ مايو ١٩٨٦. لكن كان ذلك أبعد من أن يكون نهاية هذه الإثارة التى تفجرت حول الويمپات.



شكل (٣ - ٧) يمثل هذا الرسم البيانى الذى ابتكره فولكنر عنصرًا رئيسًا فى البحث الذى أجراه. وقد أراد أن يوضح من خلاله مدى ملاءمة نظرية الويمپ. فى هذا الرسم، تم تمثيل نموذج الشمس القياسى بدائرة مفتوحة، على الخط المائل المطابق لدرجة حرارة مركزية تُقدر بـ ١٥ مليار كلفن. وهى تقع بالكاد ضمن المنطقة التى حددتها دراسات علم الزلازل الشمسية، وخارج المنطقة التى خصصتها دراسات النيوترينو الشمسى تمامًا.

إن حيل النموذج القياسى «لحل» مشكلة النيوترينو الشمسى بتغيير التركيب المفترض للشمس، «إنقاص الفلزية» أو خلط الهليوم بشكل أكبر، تبعد النماذج عن تلك المنطقة المحددة بواسطة علم الزلازل الشمسية. نموذج الويمپ (W) هو وحده الذى يقع تمامًا فى قلب المنطقة المحددة، طبقًا لكل من علم الزلازل الشمسية ودراسات النيوترينو.

لا تهتم كثيرًا بالإحداثيات الغريبة التى اختارها فولكنر ليجعل كل ما يثير الاهتمام فى الرسم التخطيطى يحدث طبقا لخطوط مستقيمة. (Tc) هى درجة الحرارة التى تم حسابها فى مركز الشمس. (Mc) هو الوزن الجزيئى فى مركز الشمس. الإحداثى السينى يتناسب مع مربع سرعة الصوت فى قلب الشمس، أما الإحداثى الصادى فيتناسب مع مربع سرعة الصوت مضروبًا فى مربع درجة الحرارة.

انتصار الويمب

شىء جيد للغاية أن تستخدم نظرية جديدة لتفسير لغز سبق لك معرفته ـ نقص النيوترينات الشمسية، أو انقسام ترددات موجات الضغط، أو أيًا ما كانت ـ ولكن ذلك لا يبعث أبدًا على الرضاء التام. إن أفضل اختبار لأية نظرية علمية هو عندما تتنبأ بشىء لم يسبق قياسه من قبل، وإن كان يمكن قياسه. فإذا ما أجريت القياسات الجديدة واتفقت مع التنبؤ، فإن هذه النظرية تكتسب مصداقية كبيرة. وفى نهاية ربيع ١٩٨٦، حانت اللحظة التى يتعين فيها على نظرية الويمب أن تخطو تلك الخطوة العملاقة لتكون جديرة بالاحترام الكامل. ونتج كل ذلك من التعاون الذى تم فى بومباى، والذى كشف عن وجود نوع آخر من الذبذبات الشمسية.

إن الموجات على سطح البحر، أو تلك التى يمكنك أن تكوِّنها فى حوض الاستحمام بتحريك الماء بعنف من جانب إلى آخر، ليست موجات ضغط، ولكنها تُعرف بأنها موجات جاذبية (g- modes)؛ لأن قوة الجاذبية هى التى تحدد مدى سرعة صعودها وسقوطها. وتحدث هذه الموجات عندما يكون هناك فارق فى الكثافة بين طبقتَىْ سائل، مثل الفرق بين الهواء والماء، أو الفرق بين طبقتين داخل الشمس. لا بد أن مثل هذه الموجات تتكون فى أعماق الشمس، وأنها شديدة الحساسية للظروف فى تلك الأعماق. لكن هناك عقبة كبيرة غير متوقعة تواجه علماء الزلازل الشمسية الذين يريدون استخدام موجات الجاذبية لسبْر قلب الشمس. فدروات موجات الجاذبية تتراوح بين ساعات وأيام، وهى مختلفة تمامًا عن ذبذبات موجات الضغط التى لا تتجاوز دورتها خمس دقائق، ومعنى ذلك أنه يمكن دراسة هذه الموجات من الفضاء فقط، لأن الأجهزة على الأرض لا تستطيع رؤية الشمس ليلاً. وحتى مهمة التقاط هذه الموجات من الفضاء ليست سهلة. إذ رغم تأثيرها القوى فى قلب الشمس، إلا أنه يمتد على السطح بشكل ضعيف؛ حيث يكون تأثير هذه الموجات على حركة رقع سطح الشمس صغيرًا جدًا بالفعل.

رغم صعوبة تحديد هوية هذه الذبذبات ـ فهى أصغر بكثير من ذبذبات الدقائق الخمس الشهيرة ـ فإن عدة مجموعات من الباحثين كانت تسعى وراءها قبل نشر بحث فريق معهد تاتا. ويدرك الباحثون أنهم «إذا» تمكنوا من العثور على آثار موجات

الجاذبية، فمعنى ذلك أنهم وجدوا مفتاحًا مباشرًا للغز تركيب الجزء الأكثر عمقًا من الشمس، لقد تنبأت النماذج القياسية بوجود سمة مميزة لموجة جاذبية يمكن تحديدها فى طيف ذبذبات الشمس، وتبلغ دورة هذه الموجة حوالى ٣٦ دقيقة (*) . لكن النماذج الشمسية التى صُممت لحل مشكلة النيوترينو، اعتمادًا على اختلاط مكونات قلب الشمس بمكونات أخرى، عدلت هذه ‹الدورة› بحوالى ٤٠٪ أو أكثر، لتصل بها إلى حوالى ٥٦ دقيقة. وبثقة، ركز العلماء الذين كانوا يحاولون العثور على مثل هذه السمة فى طيف الذبذبات الشمسية بحثهم على ذبذبة تنحصر ‹دورتها› بين أقل قليلاً من القيمة التى حددها النموذج القياسى، أى حوالى ٣٢ دقيقة، والقيمة التى حددتها النماذج المختلطة، أى ٥٦ دقيقة، بل وأطول أيضًا. غير أن ڤاهيا وجوخ وفولكنر كانوا قد أشاروا فى بحثهم الذى نُشر فى مجلة «نيتشر» إلى أن نموذج الويمپ يُحدث التأثير المعاكس، كما فى حالة موجات الضغط، وبالتالى فإن السمة المميزة لموجات الجاذبية لا بد أن تظهر عند حوالى ٢٩ دقيقة ـ وعلى حد علمهم لم يبحث أحد عند ذلك المدى أو حتى جمع بيانات.

وفى غضون ثلاثة أسابيع من ظهور عدد مجلة «نيتشر»، سمع فولكنر أن باحثًا مقيمًا فى سويسرا، هو كلوس فروهليك (Claus Frohlich)، وجد دليلاً على التأثير الذى تنبؤوا به، وقد ورد هذا الدليل فى بيانات قديمة، سجلها قمر صناعى عام ١٩٨٠ كانت مهمته رصد الشمس. لم يعثر أحد من قبل على ‹دورة› مدتها ٢٩ دقيقة؛ لأن الباحثين (بمساعدة أجهزة الكمبيوتر) كانوا ينقبون فقط عن ‹دورات› أطول، واثقين أكثر من اللازم فى النظرية القائلة بأنه يمكن حل مشكلة النيوترينو الشمسى بواسطة النماذج المختلطة! كان فروهليك قد قرأ البحث المنشور بمجلة «نيتشر» فبحث على الفور فى البيانات المخزنة فى الكمبيوتر عند ‹دورات› أقصر، وكانت الدورة الوحيدة التى وجدها هى التى تنبأ بها فولكنر وزميلاه على أساس نموذج الويمپ.

(*) فى الحقيقة، السمة المميزة ليست ‹دورة› حقيقية، لكن هى الفرق بين دورتين، كما فى حالة موجات الضغط، وتقنيًا هى «الدورة المقاربة والمعايرة التى تفصل بين موجات الجاذبية ذات المرتبة الأعلي وتلك ذات المرتبة الأدنى منها». وأقدم اعتذارى للأصدقاء من علماء الفلك؛ لأننى سأستخدم الكلمة غير الدقيقة علميًا، كلمة ‹دورة›، وأضعها بين قوسين، كاختصار لتلك الجملة الطويلة.

وبكل أمانة، لم يكن هناك أكثر من مجرد تلميح إلى إمكانية التقاط ‹الدورة› من البيانات ـ لكن لم يكن هناك أية إشارة إلى وجود ‹دورة› أخرى، وكانت السمة المميزة بالضبط حيث تنبؤوا أن تكون. وبافتراض أن السمة المميزة حقيقية، فإن التحليل الأكثر تفصيلاً بيَّن أن موجات الجاذبية تأثرت بالدوران عميقًا فى قلب الشمس بالطريقة نفسها بالضبط التى تأثرت بها موجات الضغط (أى أن مجموعتَى المشاهدات تخبرنا أن قلب الشمس يدور بالمعدل نفسه). ومجموعتا البيانات مستقلتان تمامًا، حيث تم الحصول عليهما من خلال أجهزة مختلفة (واحدة على الأرض والأخرى فى الفضاء)، وباستخدام تقنيات مختلفة لدراسة نوعين مختلفين من الذبذبات (موجات ضغط وموجات جاذبية) ولكل منهما مدى دورى مختلف تمامًا (حوالى خمس دقائق مقابل عدة ساعات). وبالرغم من كل ذلك، كانت «الإجابات» التى حصل الباحثون عليها من خلالهما واحدة. إن نموذج الويمپ هو النموذج «الوحيد» للشمس الذى يفسر فى آن واحد تلك التفاصيل الخاصة بطيف الذبذبات الشمسية، و«يحل» مشكلة النيوترينو.

هناك علماء فلك ـ أو عدد كبير منهم ـ مازالوا غير مقتنعين بنموذج الويمپ، ويفضلون على الأقل الوقوف على الحياد حتى تكتمل المرحلة التالية من عمليات رصد الشمس. لكن ثقل الدليل القائل بأن وجود جسيمات غير معلومة من قبل هو الذى يحتفظ بقلب الشمس عند درجة حرارة أقل، وأن عدد هذه الجسيمات هو واحد لكل مائة مليار بروتون داخل الشمس، وأن كتلة هذا الجسيم تتراوح بين أربعة إلى ستة أضعاف كتلة البروتون ـ أصبح الآن أكثر من مجرد دليل عرضى، ولم يعد «مجرد فكرة غريبة أخرى». أما الذين مازالوا يفضلون الانتظار حتى يتأكدوا، فإنهم لن ينتظروا طويلاً، لأن الجيل التالى من الأجهزة التى صُممت لمراقبة الذبذبات الشمسية طوال ٢٤ ساعة يوميًا ولعدة سنوات بدأ العمل بالفعل.

اختبار الـ «جونج»

المشكلة الكبرى التى تواجه محاولة علماء الفلك تحسين مشاهداتهم للذبذبات الشمسية هى دوران الأرض؛ حيث تتأثر عمليات الرصد التى تتم من موقع ما على

الأرض بدورة الليل والنهار. ولأن الذبذبات الشمسية صغيرة للغاية، يتعين تجميع مجموعات طويلة من بيانات الرصد معًا وتحليلها للكشف عن الترددات الدورية البالغة الصغر. وإذا كنت مقيدًا بمراقبة الشمس من موقع واحد على الأرض بأحد المراصد الكبرى، فإن الطريقة الوحيدة لعمل ذلك هى تجميع بيانات أيام مختلفة معا، مع مراعاة الجمع بين السجلات بحيث تظل الذبذبات محل الدراسة فى توافق طورى، كى لا يلغى بعضها بعضًا. لكن مثل هذه المجموعات «الاصطناعية» الطويلة من البيانات المسجلة لعدة أيام معًا، تحتوى «إشارات» مزيفة نتيجة فجوات الليل - فإيقاع الإشارات ليس ٢٤ ساعة فقط، وإنما يتضمن العديد من الترددات التوافقية المشتركة مع ذلك التردد الأساسى. وهذه الإشارات ظهرت فى تحليل فورييه وشوشت الصورة؛ مما جعل من الصعب على الباحثين أن يتأكدوا أى الدورات تمثل ذبذبات شمسية حقيقية وأيها من صنع الإنسان.

هناك ثلاث طرق للتحايل على هذه المشكلة، وعالجت مجموعات مختلفة من الباحثين هذه الطرق مع اقتراب التسعينيات من القرن العشرين. فلقد حاول فريق فرنسى - أمريكى مشترك إجراء عمليات رصد من القطب الجنوبى فى الصيف، حيث لا تغرب الشمس أبدًا، ونجحت الفكرة - وحصل الفريق على فترة رصد استمرت خمسة أيام متصلة بدون سُحُب، لكن ظروف العمل فى القطب شاقة حتى فى الصيف، كما أن الظروف المناخية رديئة بحيث كانت فترة الأيام الخمسة، بدون سحب، أفضل ما يمكن الحصول عليه من عملية رصد مستمرة.

أما الطريقة الثانية فهى الرصد من الفضاء، بواسطة قمر اصطناعى يمكنه مراقبة الشمس بشكل مستمر من مداره. وقد استُخدم هذا الحل فى مهمة أُطلق عليها اسم «مهمة الحد الأقصى الشمسية»، والتى أيدت بياناتها تنبؤات فريق معهد تاتا. كما يتم التحضير لمهمة مشتركة بين وكالة الفضاء الأوروبية والناسا، سُميت «المرصد الشمسى للهندسة الكروية الشمسية» (SOHO)(*)، وخُطط لها أن تنطلق فى عام ١٩٩٥، بحيث يحمل القمر جهازًا لمراقبة ذبذبات الشمس، ومن المفترض أن يرسل إلى الأرض بيانات لعدة سنوات.

(*) Solar Heliospheric Observatory.

ولكن حتى قبل إطلاق هذا المرصد، كان من المفترض استخدام التقنية الثالثة تلقائيًا، وهى إجراء عمليات رصد للشمس من مواقع مختلفة حول العالم، وتجميع القياسات للحصول على تسجيل متصل يمتد لعدة سنوات. هناك ثلاثة مشروعات من هذا القَبيل يجرى حاليًا تنفيذها، وسوف أذكر واحدًا فقط منها بشكل أكثر تفصيلاً. يُعرف هذا المشروع «بمجموعة شبكة التذبذب الكروى»، أو الـ (GONG) (*) . ويحتاج الأمر مبدئيًا إلى ثلاثة مواقع مراقبة على الأقل، موزعة حول العالم بحيث تفصل بينها ١٢٠ درجة من خطوط الطول، وسماء صافية بلا غيوم، وأدوات وأجهزة لا تتعطل أبدًا. وعمليًا، تضمنت «جونج» ستة مواقع على امتداد العالم متساوية البعد فيما بينها بقدر الإمكان.

وبينما أكتب هذه السطور فى عام ١٩٨٩، هناك عشرة مواقع تم اختيارها: موقعان فى هاواى وموقعان فى كاليفورنيا وموقع فى أريزونا وموقعان فى شيلى وموقع فى كل من جزر الكنارى والهند وغرب أستراليا، هذا بالاضافة إلى «جهاز مرجع» فى المرصد الشمسى القومى بالولايات المتحدة الأمريكية بولاية أريزونا . والذى يُعتبر المعهد الأم للمشروع.

وفى كل موقع، يوجد جهاز أتوماتيكى للتصوير فتحته خمسون مليمترًا، يلتقط كل دقيقة لقطة للشمس (حجم هذه الأجهزة متواضع جدًا، حتى إن علماء الفلك يعارضون فى تسميتها «تلسكوبات» ـ فهى أقرب ما تكون لعدسات آلة التصوير)، وتشبه فلسفة تصميم تلك الأجهزة فلسفة المهام الفضائية ـ يختار الفريق أداة قوية، ذات مخاطر تقنية منخفضة تعمل دون مساعدة من أى فنِّى بشري. ويجب أن ينظر إلى الشمس جهازان فى كل وقت، لتفادى احتمال حدوث أعطال أو ظهور سُحُب. ويقيس كل جهاز سرعات رقع الشمس وهى تتحرك إلى الداخل والخارج باستخدام أداة تُسمى تاكوميتر فورييه، وهى مقياس للسرعة الزاوية، ويمكنها قياس الزحزحة الحمراء والزرقاء بدقة تصل إلى جزء من المليار.

وتجرى أجهزة الـ «جونج» هذه القياسات عند ٦٥ ألف نقطة عبر سطح الشمس فى آنٍ واحد، وتنتج كمية هائلة من البيانات التى يتعين تخزينها ومعالجتها (فى البداية تم

(*) Global Oscillation Network Group

التخزين على أشرطة، ثم على اسطوانات ضوئية بعد ذلك). لن أتحدث بالتفصيل عن قوة الكمبيوتر المطلوبة لهذا العمل ـ لكن بالطبع لم تكن هناك ميزة فى القيام بعمليات رصد من هذا النوع فى السبعينيات من القرن العشرين، طالما أن أجهزة الكمبيوتر فى ذلك الوقت لم تكن تستطيع تحليلها (وأحد أسباب تخزين البيانات فى أسطوانات ضوئية هو الأمل فى أن يصبح لدى علماء القرن الواحد والعشرين تقنيات للتحليل أفضل من المتاح الآن). وكان من المفترض أن يكتمل تشغيل الشبكة بالكامل خلال عام ١٩٩١، وهى ممولة للعمل لمدة ثلاث سنوات. وتنتج هذه الشبكة، التى يعمل بها أكثر من ١٥٠ عالمًا من ٦١ مركز أبحاث فى ١٥ بلدًا مختلفًا، كمية بيانات يومية تُقدر بواحد جيجا بيته(*). ولا بد أن ذلك كافٍ لحل قضية اتفاق الذبذبات بالفعل مع تنبؤات نظرية الويمپ. لكن بالطبع لن تكون تلك هى النتيجة الوحيدة المهمة لمشروع الـ «جونج» ـ إذ إن دهشة أغلب علماء الفلك ستكون كبيرة إذا لم تطرح عمليات الرصد الحديثة تلك مفاجآت جديدة وغير متوقعة وتثير ألغازًا يتعين حلها خلال السنوات القادمة، كما حدث مع كل تقنية رصد جديدة، ابتداء من تلسكوب جاليليو إلى علم الفلك اللاسلكى وأقمار الأشعة السينية التى طرحت مفاجآت غير متوقعة عن الكون. كما سيُصاب أغلب علماء الفلك بالإحباط إذا لم يتوافر التمويل اللازم لاستمرار مشروع «جونج» لمدة دورة شمسية كاملة على الأقل، أى أحد عشر عامًا، بحيث يمكننا مشاهدة كيفية تغير الذبذبات الشمسية لو كانت تتغير أصلاً ـ مع انتقال الشمس عبر دورة نشاطها الكاملة.

وأنا شخصيًا سيصيبنى الإحباط إذا لم يصبح نصف هذا الكتاب كتابًا تاريخيًا بعد عقد من الآن. فخلال السنوات العشر القادمة ستمدنا «جونج» و«سوهو» وعمليات الرصد الأخرى بصورة جديدة تمامًا عن عمل الشمس أقرب النجوم إلينا، صورة مرسومة باهتمام غير مسبوق بالتفاصيل. وليس مهمًا أى النظريات هى الصحيحة، وإنما المهم هو أننا على أعتاب اكتشاف قدر من أسرار الشمس الداخلية أكبر مما اكتُشف طوال السنوات السابقة حتى الآن. والشىء الأكثر إثارة بالنسبة لنظرية الويمپ، والأدلة حتى الآن تدل على أنها فى الاتجاه الصحيح، هو أنها تربط تلك الاكتشافات الجديدة المتوقعة بكل من الكون بشكل عام وعالم الجسيمات الأوَّلية التى لا تُرى

(*) مليار بيتة.

بالمجهر - بينما تتيح إمكانية بناء أنواع جديدة من أجهزة الرصد أرخص بكثير من «جونج» و«سوهو»، ويمكن إقامتها فى معامل فردية على الأرض، ويكون بإمكانها أن تكشف لنا ليس فقط أكثر الأسرار الداخلية والدفينة للشمس، ولكن أيضًا المصير النهائى للكون نفسه.

الفصل الثامن

الكبير والصغير

إن أكثر التطورات إثارة فى مجال الفيزياء النظرية خلال عقد الثمانينيات من القرن العشرين كانت الطريقة التى أجبرت كلاً من علماء فيزياء الجسيمات والكوزمولوجيا - أو علم الكونيات - على توحيد مواهبهم من أجل تحسين وصفهم للعالم حولنا. والمنظِّرون فى مجال فيزياء الجسيمات عندما كانوا يحاولون تطوير النظرية الموحدة المحيرة التى سوف تفسر سلوك كل جسيمات وقوى الطبيعة فى حزمة رياضية واحدة، وجدوا أنفسهم مضطرين إلى تأمل تداعيات العمليات التى تجرى عند مستويات طاقة أكبر بكثير من أى شىء يمكن إنجازه اصطناعيًا، فى مسارعاتهم هنا على الأرض، ولا حتى فى قلب نجم مثل الشمس. فالمكان الوحيد لحدوث التفاعلات التى يصفها المنظرون كان الانفجار العظيم الذى ولد منه الكون منذ حوالى ١٥ مليار سنة مضت. وبالتالى، تصبح آخر نظريات فيزياء الجسيمات موضع «اختبار» باكتشاف ما إذا كان نوع التفاعلات التى يصفونها يمكن أن ينتج نوع الكون الذى نعيش فيه. إن تحسين فيزياء الجسيمات يساعد علماء الكونيات على تطوير فهم أفضل للكيفية التى نشأ بها الكون، ومن ناحية أخرى فإن تحسين عمليات الرصد الكونية بصورة عامة يساعد على وضع الحدود لتصورات الأحداث التى وقعت فى الانفجار العظيم، مما يقيد بعض التخمينات الغريبة لمنظِّرى فيزياء الجسيمات.

وفى الوقت نفسه، وجد علماء الكونيات أنفسهم فى حاجة، كما سبق أن أشرت، إلى أن يكون فى الكون كَمٌّ من المادة أكبر مما تراه العين. ويتضح من خلال الدراسات

الخاصة بأسلوب حركة المجرات أو جماعات المجرات، ومن خلال قياسات معدل تمدد الكون نفسه، أن هناك «مادة معتمة» فى الكون تُقدر كميتها بعشرة أضعاف كمية النجوم المضيئة والمجرات على الأقل، بل يمكن أن تبلغ مائة ضعف، وأن هذه المادة المعتمة تمارس قوة جاذبيتها تأثيرًا على الأجسام المضيئة.

إن حسابات الظروف فى الانفجار العظيم، والتى جمعت بشكل مثمر للغاية جهود فيزياء الجسيمات وعلم الكونيات، أثبتت بدون أى شك منطقى، أن هذه المادة المعتمة لا يمكن أن تكون كلها فى شكل ذارت مثل التى تتكون منها الشمس والنجوم والكواكب. فالمادة المضيئة فى الكون تتكون أساسًا من بروتونات ونيوترونات (التى تكون أغلب كتلة الذرات)، وتخبرنا قوانين الفيزياء بكمية هذا النوع من المادة التى يُحتمل أنها تكونت فى الانفجار العظيم (وتُعرف هذه المادة بالباريونات). ويتفق الحد الأقصى لكمية هذه المادة تقريبًا مع كمية المادة فى كل النجوم والمجرات الساطعة ـ وهى صدفة خدعت علماء الفلك لعقود طويلة، إذ جعلتهم يعتقدون أن النجوم والمجرات هى بالفعل المادة الوحيدة فى الكون. أما الآن، وقد أصبح هناك دليل يفرض نفسه على وجود تأثير لمادة معتمة إضافية، فإن الخلاصة التى لا مفر منها هى أن أغلب هذه المادة المعتمة ـ الجزء الأكبر من مادة الكون ـ ليست فى شكل الجسيمات المكونة للذرة مثل البروتونات والنيترونات، وإنما يجب أن تتكون من جسيمات لم يتم رصدها بعد على الأرض.

وكان ذلك بالطبع الأساس المنطقى للمحاولات الأولى لحل مشكلة النيوترينو الشمسى بدراسة تأثيرات الويمپات على تركيب الشمس. ليس هناك ميزة فى اختراع جسيم «جديد» لمجرد تفسير ندرة النيوترينات الشمسية. ولكن إذا كان علم الكونيات «يتطلب» وجود جسيمات إضافية، فمن الطبيعى دراسة إمكانية تأثير هذه الجسيمات على سلوك النجوم. وفى الواقع، تتطلب كل النظريات الموحدة التى طورها منظِّرو فيزياء الجسيمات وجود أنواع إضافية من الجسيمات فى الكون. هذه المتطلبات هى نتيجة النظريات التى وُضعت بمنأى عن الدراسات الكونية الخاصة بكيفية تحرك المجرات، يحتاج علم الكونيات، إلى مادة إضافية، على ألا تكون فى شكل باريونات (بروتونات ونيترونات)، لتفسير كيف تتحرك الأجسام فى الكون، بينما يحتاج علماء فيزياء الجسيمات إلى جسيمات إضافية، ليست فى شكل باريونات لكى تُكلل محاولة النظريات الموحدة بالنجاح. والمنظرون الذين يدرسون أكبر الأجسام القابلة للرصد

(المجرات) وأولئك الذين يدرسون أصغر الوحدات المعروفة (الجسيمات الأصغر من الذرة) توصلوا، كلٌ على حدة، إلى أنهم بحاجة لنوع من المادة الجديدة كى تتوافق كل الأمور معًا، ويمثل ذلك إشارة قوية على أن الفريقين يعملان فى الاتجاه الصحيح. إنها صدفة مثيرة، أن يكون نوع الجسيم الذى يلبى احتياجات المنظرين الذين يعملون مع الأجسام الكبيرة جدًا هو نفس الجسيم الذى يلبى حاجة من يعملون مع الأجسام المتناهية الصغر ويحل أيضًا أبرز لغز خاص بالشمس.

لكن الجسيمات المفترض أنها ستجعل النظريات الموحدة تنجح لن تؤثر كلها على داخل الشمس بالطريقة السليمة لحل لغز النيوترينو، كما أن الجسيمات التى يحتاجها علماء الكونيات لتماسك الكون قد لا تتفق مع وصف الويمپات الذى ورد فى هذا الكتاب. وبدلاً من جسيمات لكل منها كتلة تساوى تقريبًا خمسة أضعاف كتلة البروتون، يمكن أن يكون هناك بالتماثل عدد أكبر من جسيمات أقل كتلة، أو حتى عدد صغير نسبيا من جسيمات ذات كتل كبيرة «جدًا». لقد وضعتُ بالتفصيل فى كتابى «نقطة أوميجا» (The Omega Point) الدليل على أن الكون يجب بالفعل أن يحتوى على مادة معتمة، كما وصفت بالاشتراك مع مارتن ريس فى كتاب «صدف كونية» (Cosmic Coincidences) التنوع الضخم للمرشحين المحتملين لتكوين المادة المعتمة، ويجرى حاليًا دراستها بشكل فعلى.

لكن لا يمكن أن يكون كل هؤلاء المرشحين موجودين فى الكون الحالى، ولما كان من الضرورى حل مشكلة النيوترينو الشمسى بأى شكل، فإننى أريد أن أركز هنا فقط على النسبة الصغيرة من هؤلاء المرشحين التى تقدم حلًا أيضًا لتلك المشكلة. إذا كانت فيزياء الجسيمات تخبرنا بضرورة وجود تنويعات «إضافية» من الجسيمات فى الكون، فإن علم الكونيات يقول لنا الشىء نفسه، وتبين الدراسات الشمسية أن بعض المرشحين لتلبية «كل من» الاحتياجات الكوزمولوچية واحتياجات فيزياء الجسيمات يمكنهم أيضًا حل لغز النيوترينو، وأبسط الافتراضات وأكثرها اقتصادًا هو أن ذلك النوع من الويمپ قد يكون حقًا أهم مكون للمادة المعتمة. وربما توجد أيضًا جسيمات أخرى للمادة المعتمة - جسيم خفيف جدًا يُسمى الأكسيون (AXION)، ويُعد وجوده شبه مؤكد، إذا كانت النظريات الموحدة على الطريق السليم، كما يُحتمل أن يكون بعض المادة المعتمة فى شكل باريونات (بما يساوى كمية المادة التى نراها فى النجوم والمجرات الساطعة). لكن ٨٠٪

علىَ الأقل من كتلة الكون ليست فى شكل باريونات، وإن جزءًا كبيرًا من تلك النسبة يمكن أن يكون فى شكل ويمپاْت ذات كتل تُقدر بحوالى خمسة أضعاف كتلة البروتون - كيف لنا أن نأمل فى رصد الويمپات، إلا عن طريق تأثيرها على الشمس، ومن خلال الجذب الخفى لقوة جاذبيتها؟

المرشحون

لقد كانت النيوترينات نفسها ذات مرة مرشحة للمادة المعتمة، ففى أبحاث فولكنر وچيليلند المبكرة فى السبعينيات من القرن العشرين عن تأثير الجسيمات ذات الكتلة الكبيرة داخل الشمس على تدفق النيوترينو الشمسى، افترضا وجود نوعية ثقيلة من النيوترينو. وكان السبب فى ذلك بالدرجة الأولى، أن العلماء فى السبعينيات لم يكونوا معتادين بعد على فكرة احتمال وجود تنويعات مختلفة تمامًا من الجسيمات حولنا - لقد كانوا يعلمون أن النيوترينات موجودة. وبالتالى كان من الطبيعى أن يحاولوا تصور نيوترينات تناسب المتطلبات الفلكية. غير أن هذا الافتراض لم يصمد لمزيد من البحث.

فى عام ١٩٨٧، تلقى علماء الفيزياء الفلكية الهدية التى تمثلت فى نبضة نيوترينات قادمة من سوبرنوفا فى مجرة سحابة ماجلاَّن الكبرى المجاورة لمجرتنا. وطبقًا لنظرية الفيزياء الفلكية، تنتج السوبرنوفا $١٠^{٥٨}$ نيوترينات إلكترونية، أى عشرة أضعاف العدد الإجمالى للإلكترونات والبروتونات والنيوترونات داخل الشمس. وقدر العلماء أن حوالى ٣٠٠ تريليون (٣×١٠^{١٥}) من تلك الجسميات مرت عبر مكشاف على الأرض يبلغ حجمه سبعة آلاف متر مكعب، ويديره فريق مشترك من جامعات إيرفين وميشجان وبروك هافن؛ ولذلك سُمى فريق إى. إم. بى. ومن ذلك الفيضان من الجسيمات، سجل مكشاف إى. إم. بى وصول ثمانية نيوترينات فقط، بفاصل زمنى بين كل منها قدره ست ثوانٍ. إذا كان للنيوترينات كتلة، كما سبق توضيح ذلك فى الفصل الرابع، فإن من يتمتع منها بطاقة أكبر سينتقل بشكل أسرع ويصل إلى المكشاف قبل غيره، أما إذا لم يكن للنيوترينات كتلة، فسوف تنتقل بسرعة الضوء، مثل الفوتونات، وستصل معًا (بافتراض أنها بدأت رحلتها معًا). وكما أوضحت سابقًا، حاول باحثون آخرون تقدير كتل النيوترينات بدراسة الدلالات الضمنية لأزمنة وصول النيوترينات من السوبرنوفا إلى أجهزة الرصد المختلفة على الأرض. لكن ماذا يحدث إذا نظرنا لبيانات إى. إم بى.

فقط، وافترضنا أن سبب كل ما تم رصده هو وصول نيوترينات إلكترونية، ونتجاهل الباقى؟ إن قياسات انتشار تلك النبضة من النيوترينات على أزمنة وصولها من السوبرنوفا تبين استحالة أن تزيد كتلتها عن عشرة إلكترونات فولت، بل يرجح أن تكون أقرب إلى ثلاثة إلكترونات فولت، إن لم يكن لها كتلة على الإطلاق. إن وحدات الإلكترون فولت، صغيرة جدًا، ومن ثَم تكون الكتلة المفترضة صغيرة للغاية أيضًا ـ حيث تكافئ كتل الإلكترون إجمالى كتل ١٥٠ ألفًا من هذه النيوترينات. وتؤثر هذه التوقعات بشكل مباشر على مشكلة النيوترينو الشمسى، وذلك بطريقتين.

أولاً، إذا كان افتراض ثلاثة إلكترونات فولت (أو حتى عشرة إلكترونات فولت) صحيحًا، فإن ذلك يعنى وفقًا لحسابات رامانثان كوسيك (Ramanathan Cowsik) التى تم شرحها فى الفصل الرابع، أن الكتل كبيرة «جدًا» بما لا يسمح بنوع ذبذبات النيوترينو التى اقترحها بعض المنظرين لحل اللغز (تاثير MSW). ثانيًا، لا تستطيع النيوترينات ذات الكتلة الصغيرة جدًا أن توفر بأية حال المادة المعتمة التى يتطلبها علماء الكوزمولوچيا، وبذلك يُترك المدى واسعًا لجسيمات غير معلومة لتملأ الثغرة. وفى الحالتين، جعلت دراسات نيوترينو السوبرنوفا قضية الويمپات تفرض نفسها بشكل أكبر.

إن ذلك لا يعنى استحالة أن يتنكر نوع آخر من النيوترينو فى شكل ويمپ. وتذكر، أنه قد ثبت وجود ثلاثة أنواع من النيوترينات: النيوترينو الإلكترونى، والنيوترينو المرتبط بجسيم التو، والنيوترينو الميونى، أى المرتبط بجسيم الميون. ولكن لا يوجد من بين الأنواع الثلاثة من لديه كتلة تكفى كى يكون الويمپ الذى نبحث عنه. غير أن هذا التثليث ترتيب ملائم جدًا ينسجم بإحكام ضمن إطار أكثر النظريات الموحدة قبولاً، ويبدو أنه يربط «عائلات» النيوترينو الثلاث بتنويعات من الجسيمات الأساسية تُعرف بالـ«كواركز». ويفترض وصف فيزياء الجسيمات وعلم الكوزمولوچيا لما حدث فى الانفجار العظيم، ضرورة وجود ثلاث فقط من هذه العائلات، لكن هناك تفاوتًا مسموحًا به فى تلك الحسابات يسمح باحتمال وجود نوع رابع من النيوترينو ـ هناك تشكك واسع فى أى تنبؤات عن طبيعة مثل هذا الجسيم تسمح بإمكانية أن يكون له كتلة تُقدر بحوالى خمسة أضعاف كتلة البروتون. إن افتراض هذا الجيل الرابع من النيوترينات كمرشح للويمپ يعكس سذاجة بالغة، لكنه ليس محظورًا تمامًا فى ظل

المحصول الحالى لنظريات الجسيمات أو فهمنا للانفجار العظيم(*). غير أن العثور على مرشحين أكثر قبولاً ليس بالأمر الصعب.

لقد ذكرت فى الفصل الخامس طريقة للحصول على الويمپات ـ وهى المفضلة بالنسبة لى. نحن نعلم أن عدم التماثل فى قوانين الفيزياء سمح بإنتاج باريون واحد (بروتون أو نيوترون) لكل مليار فوتون («جسيمات» الضوء) التى انبعثت من الانفجار العظيم. وإذا كان هناك نوع آخر من الجسيمات له كتلة تتراوح بين خمسة وعشرة أضعاف كتلة البروتون وتم إنتاجه أيضًا بالطريقة نفسها، وطبقًا لنفس عدم التماثل، ومع نسبة مليار إلى واحد نفسها؛ فقد يكون هناك ويمپ واحد فى الكون لكل باريون (بروتون أو نيوترون). وفى مجرة مثل مجرتنا، فإن كتلة كل الويمپات مجتمعة ستقدم بالضبط تفسيرًا لطريقة حركة النجوم، وربما تترك فرصة ما لمزيد من المادة المعتمة فى الكون فى شكل نيوترينات خفيفة أو أكسيونات، ذلك الجسيم المغرم به علماء الفيزياء.

أما الطريقة الأخرى الممكنة للحصول على الويمپات، فتتعلق «بالتماثل» وليس «عدم التماثل». هناك دائمًا فى قوانين الفيزياء نوع من التماثل كما بين المادة (إلكترونات وبروتونات وما يماثلها) والمادة المضادة(**) (النيوترونات والبروتونات المضادة، وهلم جرًا)، وتفترض الأفكار الحديثة عن العلاقة بين الجسيمات والقوى ضرورة وجود نظير لكل نوع من الجسيمات نعرفه. إن بعض الجسيمات، مثل الفوتونات، تقوم بالفعل بمهمة نقل القوى فى عالمنا. فالفوتونات تحمل القوى الكهرومغناطيسية، وتنقلها ويحمل الجرافيتون قوة الجاذبية، وهكذا إلى آخره. أما الجسيمات الأخرى مثل النيوترونات والبروتونات، فهى كتل من المادة وإن كانت تتأثر بالقوى إلا أنها فى حد ذاتها لا تنقل قوة. وكجزء من بحثهم من أجل النظرية الموحدة لتفسير القوى والجسيمات فى حزمة واحدة، يدرك علماء الفيزياء الحاجة إلى التماثل بين الاثنتين، وإن ذلك يتحقق على أكمل وجه بأن تُخصص لكل نوع من الجسيمات قوة ناقلة «جديدة» تصاحبه، ولكل نوع من القوى الناقلة جسيم جديد يصاحبها.

(*) فور كتابة هذه الكلمات فى نهاية عام ١٩٨٩، أعلن علماء الفيزياء فى CERN أن قياسات جديدة تقصر بشكل نهائى عدد أنواع النيوترينات المثلة على ثلاثة أنواع. وإذا صمدت هذه النتائج الجديدة للفحص الدقيق، كما يبدو، فإن ذلك يغلق للأبد هذا المنفذ الخاص.

(**) المادة المتكونة من جسيمات مضادة.

إن ذلك ليس سيئًا بالقدر الذى يبدو عليه، طالما أن نوعية واحدة من كل تلك المجموعة من الجسيمات الجديدة يجب أن تكون ثابتة ومستقرة. ففى ذلك النظام، تنحل كل الجسيمات الثقيلة الجديدة إلى جسيمات أخف وزنًا على التوالى، باستثناء أخفها جميعًا الذى لا يمكنه التحول إلى شىء آخر. ولأسباب جلية، تُعرف هذه النظرية بنظرية التناظر الفائق. وتتنبأ هذه النظرية بوجود نوعية واحدة فقط من الجسيمات غير معروفة من قبل فى كوننا بشكل عام، وهى «الشريك فائق التناظر الأخف»، أو LSP. وأقرب مرشح لهذا الجسيم هو نظير الفوتون الذى لُقِّب بالفوتينو(Photino). وتتنبأ نظرية التناظر الفائق «بشكل مستقل تمامًا» عن أى من الاعتبارات الكوزمولوچية الخاصة بالمادة المعتمة، أو التخمين بأن وجود الويمپات فى قلب الشمس يمكن أن يحل مشكلة النيوترينو الشمسى، بأن الفوتينو ستكون له كتلة تزيد بعدة أضعاف عن كتلة البروتون، وأنه سيتفاعل بشكل ضعيف مع المادة العادية. ومن ثَم فإن الفوتينو، إذا وُجد بالفعل، يكون هو بالضبط الويمپ الذى تحدثت عنه.

وحتى لو كان علماء الكوزمولوچيا ليسوا توَّاقين للعثور على المادة المعتمة لتفسير كيف تتحرك النجوم والمجرات، وحتى لو لم تكن هناك مشكلة نيوترينو شمسى يتعين حلها، يجب أن يكون علماء فيزياء الجسيمات فى لهفة لإجراء تجارب معملية لرصد الويمپات، وبوجود ثلاثة أسباب تفرض البحث عن الويمپ، يصعب الاندهاش من أن مثل هذه التجارب تخرج حاليًا من مرحلة التخطيط إلى التنفيذ.

كيف تلتقط الويمپ الخاص بك

إذا كان بإمكان الويمپات أن تقدم الحل لتلك المشكلات المنفصلة لعلوم الكوزمولوچيا والفلك والفيزياء، فإنه يتعين وجودها بوفرة تتيح العثور عليها. إن متوسط كثافة مثل هذه المادة المعتمة فى الجزء الخاص بنا من المجرة يجب أن يكافئ كتلة بروتون تقريبًا فى كل ثلاثة سنتيمترات مكعبة من الفضاء. وإذا كان كل جسيم ويمپ له كتلة تُقدر بحوالى خمسة أضعاف كتلة البروتون، فيجب أن يكون هناك ويمپ واحد فى كل سم^3 من الفضاء - ولا يُقصد بذلك «الفضاء الخارجى الخالى» فوق الغلاف الجوى للأرض، ولكن هذا العدد من الويمپات يمر عبر الغرفة التى أجلس فيها وأنا أكتب، وعبر جسمك وأنت تقرأ هذه الكلمات، وعبر كل معامل الفيزياء على الأرض، وطبقًا لهذا الوصف الدقيق فإن كل لتر من الهواء حولك، يحتوى بالفعل ما بين ستين إلى سبعين من الويمپات.

ويتحرك كل ويمپ بسرعته الخاصة المستقلة عبر المجرة ـ غير أنه مستقل فقط حتى حد معين، فإن حركة الويمپ مثلها مثل حركة الكواكب التى تدور حول الشمس والنجوم التى تدور حول المجرة، بل وجزيئات الهواء فى الغلاف الجوى للأرض، فإنها جميعًا محكومة بقوة الجاذبية. إن متوسط سرعة الأجسام الخاضعة لقوة جاذبية نظام درب اللبانة ككل والتى تدور على بعد المسافة نفسها تقريبًا التى تفصل نظامنا الشمسى عن مركز درب اللبانة، واحدة أيا كانت كتلة هذا الجسم، سواء أكان بروتونًا أم نجمًا ـ وهى لا تزيد على واحد على ألف تقريبًا من سرعة الضوء، أى حوالى ٣٠٠كم/ ث. وتُقدر سرعة دوران الشمس والنظام الشمسى حول المجرة بحوالى ٢٢٠كم/ث، وذلك بالنسبة لمدار دائرى، وهى تقريبًا نفس سرعة الويمپ فى الجوار حولنا، لأن النظام الشمسى يجب أن يخضع لنفس قانون الجاذبية. لكن الويمپات تستطيع أن تتحرك فى أى اتجاه، وليس فى مدارات دائرية، ومن ثم فإن مدى سرعتها النسبية بالنسبة للأرض، يمتد من صفر (بالنسبة للويمپات التى تتحرك حول المجرة بالطريقة نفسها التى نتحرك بها) إلى حوالى ٥٠٠كم/ ث (بالنسبة للويمپات التى تتحرك فى الاتجاه المعاكس مصطدمة رأسًا معنا).

ومع أن ذلك يوحى بأن أعدادًا كبيرة من الويمپات تتحرك بسرعات كبيرة جدًا، فإننا نحصل على منظور مختلف إذا قارنًا تلك الأعداد بأعداد جزيئات الهواء نفسه. فعلى سبيل المثال، يوجد الأكسچين فى الهواء فى شكل جزيئات يتكون كل منها من ذرتين من الأكسچين، وبالتالى فإن كل جزىء له كتلة تُقدر بحوالى ٣٢ ضعف كتلة البروتون ـ أى أكبر عدة مرات من كتلة الويمپ. وتضم كتلة من الأكسچين تُقدر بحوالى ٣٢ جرامًا أكثر من ٦٠٠ الف مليار مليار جزىء، أى (٦ × ١٠^٢٣، ثابت أفوجادرو). وهناك «عدة» مليارات من الذرات والجزيئات العادية التى نتعامل معها يوميًا، فى الحجم نفسه من الهواء الذى يمكن أن نجد فيه حوالى مائة ويمپ تقريبًا، وكتلة كل واحدة من هذه الذرات والجزيئات أكبر من كتلة الويمپ. وتتحرك تلك الجزيئات نفسها بسرعة كبيرة ـ سرعة جزيئات الأكسچين فى الهواء الذى تتنفسه حوالى ٥٠٠ متر/ ث ـ وإن كانت ليست فى سرعة العديد من الويمپات. لكن على نقيض جزيئات الهواء تلك، فإن الويمپات لا تشارك فى التفاعلات اليومية التى تدخل فيها الكهرومغناطيسية. إنها تتفاعل بشكل ضعيف مع مادة الحياة اليومية التى تكون شفافة تقريبًا للويمپات، كما هى كذلك بالنسبة للنيوترينات.

إن القوى الكهرومغناطيسية، من بين أشياء أخرى، هى التى تُكْسب الأجسام الصلبة صلابتها. أن الذرة تتكون من نواة متناهية الصغر تحيط بها سحابة أكبر بكثير من الإلكترونات، وهذه الإلكترونات هى التى تتفاعل مع إلكترونات الذرات الأخرى فى الجسم الصلب لتثبِّت الذرات فى مكانها فى نظام شبكى ثابت. يعنى إنه ثابت، بقدر ما تكون الذرات والجزيئات الأخرى معنية. فعندما أضربُ على مفاتيح جهاز الكمبيوتر بأصابعى عند طبع هذه الكلمات فإن أصابعى لا تخترق لوحة المفاتيح؛ لأن الإلكترونات المحيطة بالذرات فى أطراف أصابعى تَلْقَى مقاومة من الإلكترونات المحيطة بالذرات فى المفاتيح. إن النواة المدفونة عميقًا داخل تلك الذرات لا تشارك مباشرة فى هذه العملية على الإطلاق ـ إن حجم النواة مقارنة بسحابة الإلكترونات يكافئ تقريبًا حجم حبة بازلاء فى وسط قاعة موسيقى. فعلى سبيل المثال، سيتنافر جزىء أكسچين مع قطعة رصاص؛ لأن سحابة إلكترونات الأكسچين تتفاعل مع إلكترونات الذرات على سطح الرصاص، فى حين أن الويمب لن يلاحظ وجود الإلكترونات، إن أى ويمب يصل إلى سطح قطعة الرصاص سيشق طريقه بسعادة عبر سُحُب الإلكترونات، غير مكترث بها مثل قذيفة مدفع تتحرك عبر الضباب. سوف «يُلاحَظ» وجود الرصاص فى حالة واحدة، إذا توجه رأسًا إلى «النواة»، وهو أمر نادر الحدوث، وإن كان غير مستحيل. إن أجهزة رصد الويمب التى صُممت ونُفذت فى الوقت الراهن تهدف إلى الاستفادة من مثل هذه الحالات النادرة، وذلك بقياس التغيرات التى قد تحدث فى بللورة صلبة نتيجة تصادم الويمپات بأنويتها.

إن المهمة ممكنة وقابلة للتنفيذ، ولكنها تتطلب بعض تقنيات القياس المتطورة. إن ما يجعلها قابلة للتنفيذ هو أن هناك كتلاً لأنوية ذرية فى مدى الكتل المعقولة للويمپات. إن كتلة نواة عنصر الهيدروچين، أخف العناصر، تساوى كتلة بروتون واحد فقط، أما كتلة نواة الكربون فتساوى ١٢ ضعف كتلة البروتون، وهكذا. وتنتقل الطاقة من جسيم إلى آخر بشكل أكثر كفاءة أثناء الاصطدام عندما يكون للجسيمين الكتلة نفسها تقريبًا ـ وبالتالى فإن المواد العادية يمكنها «ملاحظة» تأثير الويمپات. ويُعتقد أن عدد مصادمات الويمپ التى يمكن ملاحظتها يوميًا فى كل كيلوجرام من مادة ما يتراوح بين ويمپ واحد ومائة ويمپ ـ ويتوقف العدد الصحيح على تفاصيل صفات الويمپات، وهى تفاصيل لا يمكننا اكتشافها إلا برصد بعض هذه الويمپات وقياس تأثيرها على قطع من المادة. إذًا لن تحتاج إلى كتلة شديدة الضخامة من الچرمانيوم مثلاً، لكى تقوم بدور مكشاف

للويمپ (فلن تحتاج بالطبع إلى مثل كتلة سائل التنظيف الذى استخدمه راى داڤيز فى مكشاف النيوترينو). لكن ستحتاج إلى وسائل حساسة لرصد التغيرات فى قطعة الچرمانيوم (أو أى عنصر آخر) الناجمة عن وصول الويمپات.

ويتابع الباحثون حاليًا عدة طرق لمعالجة هذه المشكلة. بعض هذه الطرق دقيق ويتعلق بالتغيرات فى صفات «الهدف»؛ غير أنه لا يمكن فهمها بشكل صحيح إلا إذا كان لديك خلفية كاملة فى فيزياء الكم. لكن هناك طرقًا أخرى أسهل للفهم مبدئيًا، وأكثر مباشرة للتفسير عمليًا، وسألتزم هنا بثلاثة أمثلة فقط.

أحد الاحتمالات أن يبدل اصطدام ويمپات مع أنوية أشباه الموصلات، مثل الچرمانيوم، الصفات الكهربية للمادة بشكل قابل للقياس. إن أشباه الموصلات مواد غريبة بعض الشىء، حيث إن إلكتروناتها المرتبطة بالأنوية فى النظام الشبكى للبللورة لا تكون مقيدة بشكل قوى فى مكانها. وفى ظل الظروف المناسبة، يستطيع إلكترون أن يتشجع ليقفز من مكانه فى البللورة، تاركًا وراءه فجوة إلكترونية. ولأن الإلكترونات تحمل شحنة سالبة، فإن الفجوة الإلكترونية تتصرف مثل إلكترون ذى شحنة موجبة. وقد يؤدى اصطدام بعض الويمپات بأنوية مثل هذه البللورة إلى إنتاج بعض أزواج إلكترون - فجوة إلكترونية التى يمكن رصدها.

والإمكانية الأخرى هى الاستماع، حرفيًا، للصوت الذى يحدثه الويمپ عند اصطدامه بنواة فى البللورة، فعند ارتداد النواة من الضربة، فإنها تحتك بشكل خفيف بالأنوية المجاورة، مرسلة مُوَيْجة من التشويش - موجة صوتية - عبر البللورة. ولقد اقترح بلاس كابريرا وزملاؤه بجامعة ستانفورد تركيب صف من المجسات الصغيرة الحساسة على كل واحد من أسطح بللورة مناسبة، بحيث تقيس الذبذبة الدقيقة جدًا، التى تشبه الهزات الأرضية المصغرة، فعند اصطدام الويمپ تتولد موجة صدمة ترسل إلى السطح تلك المويجات الدقيقة. إننى أفضل هذه التقنية، لأنها تثير إمكانية استخدام «علم الزلازل البللورى» لرصد الويمپات فى المعمل، وتربط ذلك بشكل جميل مع استخدام علم الزلازل الشمسية لقياس آثار الويمبات على الشمس. وإذا تمكنوا من فعل ذلك، فستكون حيلة بارعة للغاية بالفعل.

لكن ربما يكون أبسط تناول لمشكلة رصد تصادمات الويمپ مع المادة العادية (والأقرب إلى النجاح إذا كان للويمپ الصفات التى افترضتها الدراسات الشمسية) هو

ببساطة قياس الحرارة الناجمة عن التصادم. إن الحرارة مقياس لكمية حركة الجزيئات والذرات المكونة للمادة، سواء أكانت صلبة أم سائلة أم غازية ـ فالجسم الأكثر سخونة هو ذلك الجسم الذى تتحرك فيه الجزيئات والذرات بسرعة أكبر (متذبذبة ذهابًا وإيابًا داخل الجسم الصلب، أو متجولة بحرية أكبر فى السوائل والغازات) وتحتك مع بعضها بقوة أكبر، وبالتالى، عندما يندفع ويمپ إلى داخل النواة، ويجعلها تحتك بالأنوية المجاورة لها، فإن حرارة البللورة ترتفع لأن طاقة حركة الويمپ القادم تحولت إلى حرارة. ولكن للأسف، كمية الحرارة التى تنطلق صغيرة للغاية ـ إن جهاز رصد مصنوع من كيلوجرام واحد من السيلكون، ويعمل فى ظل ظروف مثالية، سترتفع درجة حرارته نتيجة تصادم ويمپ واحد معه بأقل من خمسة على ألف من الدرجة، أى أقل من ٥ ميلليكلفن. لكن إذا كانت البللورة باردة جدًا فى بداية التجربة (تم تبريدها بواسطة هليوم سائل إلى درجة لا تتعدى بضع درجات كلفن، أى حوالى ـ ٢٧٠ْم)، فإن هناك إمكانية حقيقية لقياس مثل هذه التغيرات المتواضعة فى درجة الحرارة.

إن ما يتضمنه ذلك من جهد يستحق العناء المبذول فى سبيله، على أساس أنه قد يكشف عن مكان وجود تسعة الأعشار «المفقودة» من الكون. لم يقم أحد بعد بتجربة الحيلة ـ لم يقس أحد بالفعل بعد أيًا من هذه الآثار التى يمكن أن تُعزى بدون أى لبس للويمپات. لكن كل هذه الإمكانات، وأكثر منها سيتم اختبارها بتجارب جاهزة للعمل خلال العقد القادم إن نتائج التجارب لم تضع، حتى الآن، سوى حدود المدى الممكن لكتل الويمپ، مثل تجارب قياس كُتَل النيوترينات. وستضيق هذه الحدود عندما يتم تشغيل التجارب الجديدة فى غضون السنوات القليلة القادمة ـ أو إذا تمت عملية رصد فعلية للويمپ.

غير أن الحدود لا تمثل حاليًا أية إعاقة لهؤلاء المنظرين، الذين يتوقعون بلهفة الرصد النهائى للويمپ.

النتائج حتى الآن

إن أفضل الحدود لكتل الويمپ حتى الآن قدمتها تجارب صُممت وأقيمت لدراسة تفاعلات جسيم آخر، إلا أن التجربة كانت حساسة لأنواع معينة من الويمپات كذلك، ولا يوجد حاليًا مكشاف مخصص لرصد الويمپ يبحث عن مدى الكتلة «الصحيح». لكن إحدى التجارب الموجودة تعطيك إحساسًا طيبًا، عن نوع الجهد المبذول.

وهذه التجربة بالذات كانت قد بُنيت بالفعل لبحث ودراسة ظاهرة أخرى، تُعرف بانحلال بيتا المزدوج، وهى ظاهرة تتطلبها أفضل نظريات الفيزياء الموحدة(*)، مثلها مثل الجسيمات «الجديدة». وتتلخص هذه التجربة فى مراقبة سلوك أزواج «الإلكترون ـ الفجوة الإلكترونية» فى بللورة جرمانيوم. وهى ترصد فى الواقع نبضة الطاقة التى يطلقها الإلكترون عندما يسقط مرة أخرى فى الفجوة الإلكترونية، فورًا بعد الاصطدام الأصلى مع جسيم خارجى، ذلك الاصطدام الذى أزعج شبه الموصل وخلق هذه الفجوة. وبدأت هذه المعدات تنتشر إلى حد ما، وفى حالة المكشاف الذى طوره رونالد برودزينسكى الباحث بمعامل باتل باسفيك نورثويست، وفرانك أفينيون الباحث بجامعة ساوث كارولينا، فإنه يتكون من بللورة جرمانيوم تزن ٧٢, كيلوجرام ومعدات أخرى ملحقة بها. لكن المشكلة أن أى شىء تقريبًا يصطدم مع الأنوية فى النظام الشبكى للبللورة سيطلق رد فعل إلكترون ـ فجوة الكترونية، ويتعين بالتالى حماية المكشاف من الأشعة الكونية، ومن أية خلفية إشعاعية. ومن ثَم لا يوجد مكان لهذا الجهاز أفضل من منجم هومستك للذهب بجانب مكشاف داڤيز للنيوترينو على عمق ١٦٠٠ متر تحت سطح الأرض.

لكن فريق العمل واجه مشكلات حتى فى هذا المكان، فالصخور المحيطة نفسها مشعة بدرجة تكفى لتشغيل المكشاف، ومن ثَم يتعين تدريعه بمادة خاملة لا تحتوى على أية أنوية مشعة على الإطلاق. وفى الحقيقة، يصعب فى الوقت الحالى العثور على مثل هذه المادة على سطح الأرض. فبالإضافة إلى النشاط الإشعاعى قصير الأجل الذى يُحدثه تأثير الأشعة الكونية نفسها، فإن أغلب المواد الحديثة ملوثة بآثار من إشعاع القنابل النووية التى تم تفجيرها فى الغلاف الجوى منذ الحرب العالمية الثانية. وتُعتبر بقايا هياكل السفن الحربية الألمانية الغارقة شمال اسكتلندا منذ الحرب العالمية الأولى هى أحد مصادر الصلب غير المشع الذى مازال يُستخرج لاستخدامه لبعض الأغراض العلمية. غير أن الرَّصَاص يقدم حماية أفضل ضد الإشعاع، والجهاز الموجود بمنجم الذهب مدرع بالفعل برصاص تم الحصول عليه من حطام سفن الأسطول الحربى الإسبانى الشراعية الضخمة التى غرقت فى بداية القرن السادس عشر.

(*) لو كنت توَّاقًا لأن تعرف، فلقد تم رصد انحلال بيتا المزدوج، مؤكدًا بذلك أن تلك النظريات الموحدة تمضى على الطريق الصحيح ـ وهو ما يمثل دليلاً عرضيًا على أن الويمپ موجود أيضًا.

وبعد كل هذه الجهود، وجهود أخرى لتقليل خلفية «الضوضاء» التى تؤثر على الجهاز، لم يتمكن الفريق، حتى الآن، إلا من وضع حد أعلى «فقط» لكتل الويمپ. لم يعثروا على دليل لأى جسيمات تزيد كتلتها على عشرين ضعف كتلة البروتون، ويؤكدون أن مثل هذه الجسيمات لو كانت موجودة لتم العثور عليها. ويُعد ذلك أخبارًا طيبة، لأن اكتشاف ويمپات ذات كتل عالية لهذه الدرجة (أكثر من عشرين ضعف كتلة البروتون) كان سيمثل إحراجا قاسيًا لعلماء الفيزياء الفلكية الذين يحاولون حل مشكلة النيوترينو الشمسى.

أما الحد الأدنى لكتل الويمپ، فقد حددها مكشاف آخر تم وضعه أيضًا فى منجم هومستك، بهدف البحث عن النيوترينات. وكان فريق برئاسة إدوارد فيرمان الباحث بمرصد سميثسونيان للفيزياء الفلكية بكمبريدج، ماساتشوسيتس، قد ذكر فى عام ١٩٨٨ هذا الحد الجديد. ويتكون جهازهم من ستة أطنان من هيدروكسيد البوتاسيوم، حيث يجب أن يتكون أرجون ـ ٣٧ نتيجة تفاعل النيوترينات أو انواع معينة من الويمپ (كما حدث) مع أنوية البوتاسيوم ـ ٣٩ . وبعد ثلاث سنوات من التشغيل، لم تنتج التجربة أى دليل على تفاعلات لنيوترينو أو لويمپ. إن الطريقة التى يعمل بها هذا المكشاف تجعله بالفعل أكثر حساسية للجسيمات «الأخف وزنًا» (فهو مصمم لرصد نيوترينات) ـ وبالتالى؛ فإن عدم رصد أية تفاعلات يخبرنا أنه إذا كانت هناك أية ويمپات فإن كتلتها ستكون «أعلى» من كتلة البروتون، بل ومن المحتمل أن تكون أكبر من كتلة ثلاثة بروتونات.

وبدا الأمر أكثر إثارة للاهتمام، حيث يحتاج علماء الفيزياء الشمسية إلى ويمپات تتراوح كتلتها بين حوالى خمسة إلى عشرة أضعاف كتلة البروتون، مع تفضيل الحد الأدنى لهذا المدى. بل أصبح الأمر أكثر إثارة عندما قدم مكشاف جرمانيوم آخر حدًا «أعلى» أكثر إحكامًا، وكان ذلك أيضًا فى عام ١٩٨٨ . ويتولى تشغيل هذا المكشاف فريق من ثلاثة مراكز بحث (جامعة كاليفورنيا، سانتاباربارا ـ ومعمل لورانس ببركيلى فى كاليفورنيا ـ وجامعة كاليفورنيا ببركيلى). تقول تلك التجربة إن كتلة الويمپ يجب أن تكون «أقل» من تسعة أضعاف كتلة البروتون. إن مدى الإمكانات التى تسمح بها المشاهدات هو «بالضبط» المدى الذى يتطلبه علماء الفيزياء الفلكية، غير أننا لن نعرف يقينًا هل هؤلاء العلماء على حق حتى تكتمل تلك التجربة الحاسمة التى تقيس فعلاً كتلة الويمپ. والحصول على الإجابة قبل القرن الواحد والعشرين.

نحو المستقبل

طرأت تغيرات كثيرة على علم الفلك فى السنوات الأخيرة، ولعل من العلامات على مدى هذا التغيير أن أجهزة الرصد التى يتضمنها هذا البحث ليست تلسكوبات فى مراصد على قمم الجبال، وإنما أجهزة رصد تحتوى على أطنان من هيدروكسيد البوتاسيوم (أو أى شىء آخر) مدفونة فى قاع منجم تحت سطح الأرض - إن منجم هومستك، حيث تعمل فى آن واحد عدة أجهزة رصد فلكية للجسيمات، يستحق بكل المقاييس وصف «مرصد هومستك». لكن تظل التلسكوبات البصرية التقليدية مثيرة للإعجاب فى جد ذاتها، حيث أطنان من الصلب بدلاً من هيدروكسيد البوتاسيوم، مركبة فى قباب مبنية لهذا الغرض ومحاطة بأجهزة كمبيوتر ومعدات رصد إلكترونية. هل هناك فارق كبير بالفعل؟ الإجابة يجب أن تكون «نعم»، لأن أطنان المواد فى مكشاف الجسيمات ليست جزءًا من بنيته الأساسية، وإنما هى «المكشاف» ذاته.

إن التباين بين طرق الفلك القديمة والجديدة أكبر مما يبدو للوهلة الأولى. ولقد أوضح چون فولكنر ذلك بقوة عندما تكلم عن مشكلة النيوترينو الشمسى، وأكد أن الجزء المهم من تلسكوب مثل التلسكوب العاكس بمرآته ذات المائة والعشرين بوصة، الموجود فى مرصد ليك حيث يعمل هو، «ليس» الخمسين طنًا أو نحوها من العوارض المعدنية فى الدعامات ولا المرآة نفسها (١٢٠ بوصة)، إنما هو ذلك الجزء الضئيل الذى يتفاعل بالفعل مع فوتونات الضوء ويركزها على أجهزة الرصد، إنه تلك الطبقة الرقيقة جدًا من الألومنيوم التى تكسو سطح المرآة، وتبلغ كمية الألومنيوم الموجودة فى هذه الطبقة الرقيقة سنتيمترًا مكعبًا واحدًا فقط، وهو يمثل كل ما تحتاجه إذا كنت تريد دراسة الفوتونات.

لكن فى حين يكسو سطح مرآة ذلك التلسكوب سنتيمتر مكعب واحد فقط من الألومنيوم، فإن «السطح» الداخلى للصندوق المستطيل المصنوع من الصلب الذى يحتفظ بمكشاف داڤيز «مبطَّن» بمائة ألف جالون فوق كلوريد الأثيلين. وأنت بحاجة لكل ذلك «السطح التشغيلى» إذا كنت تريد دراسة النيوترينات - إن ذلك التباين فى الحجم يعطى مقياسًا صادقًا للاختلافات الجوهرية بين تلسكوبات الفوتونات وتلك الخاصة بالنيوترينات. وتشبه مكشافات الويمپ إلى حد كبير مكشافات النيوترينو، لدرجة أن بعض هذه الأجهزة، كما رأينا، يمكن أن تقوم برصد الجسيمين.

إن الأنواع الحديثة من أجهزة الرصد تفتح دائمًا آفاقًا جديدة فى علم الفلك. لقد كانت التلسكوبات، مثل تلسكوب المائة والعشرون بوصة الموجود فى مرصد ليك، هى ذاتها وسيلة لتغيير فهمنا للكون. والآن ونحن على عتبة ثورة جديدة، سيتغير مرة أخرى فهمنا للكون، عندما تبدأ فى الظهور النتائج الإيجابية للجيل الجديد من أجهزة الرصد. وفى ضوء القرائن، فإن المؤشرات قوية على أننا نقف على أعتاب اكتشاف جديد رائع، ألا وهو تحديد هوية هذا النوع من الجسيمات الذى يكون أكثر من ٩٠٪ من كتلة الكون. إن «كل» ما درسته أجيال علماء الفلك السابقين يمثل فقط قمة جبل الثلج الكونى. ومن ناحية أخرى، يمكن أن يكون كل الافتراضات والمشاهدات التى اعتمدت عليها تلك التجارب خاطئة. ورغم أن ذلك قد يكون محبطًا، خاصة بالنسبة لعلماء الفيزياء الفلكية الذين أغراهم (مثلى) جمال الحل الذى يقدمه الويمپ للغز النيوترينو الشمسى، فإنه قد يكون اكتشافًا أكثر إثارة بطريقة ما، حيث سيضطر المنظرون إلى البدء من جديد فى محاولة استنباط كيف تعمل النجوم، وما الذى يجعل المجرات تتماسك معًا، وكيف يمكن توحيد وصف الجسيمات والقوى فى حزمة رياضية واحدة.

لقد كنا، أو بالأحرى كان أجدادنا الأقربون، فى ذلك الموقف من قبل ـ ليس مرة واحدة بل مرتين، خلال أكثر من مائة عام بقليل. وحينذاك، مثل الآن، كانت الدراسات عن الشمس هى مفتاح التطورات ذات التداعيات التى كان لها صداها وانعكاساتها فى دنيا العلم. لقد كان وليم طومسون (لورد كلفن بعد ذلك) مقتنعًا بأن مصدر طاقة الشمس لا بد أن يأتى من انهيار ناجم عن قوة الجاذبية. كان متأكدًا من افتراضاته فى الستينيات من القرن التاسع عشر، مثل يقين أى واحد من أنصار نظرية الويمپ، بصحة افتراضاته فى الثمانينيات من القرن العشرين. لكن طومسون عاش ليسمع راذرفورد يصف اكتشاف مصدر طاقة جديد، من انحلال الراديوم. منذ ستين عامًا، أى فى نصف الفترة الزمنية تقريبًا التى تفصل بين الصياغة النهائية لنظرية طومسون الخاصة بالانكماش الناجم عن قوة الجاذبية وبين بحث فولكنر وآخرين الذى طرح بفصاحة مماثلة قضية الويمپ، كان لغز كيف يمكن للأنوية أن تلتصق معًا فى النجوم بينما تقول الفيزياء القياسية إن درجات الحرارة هناك منخفضة للغاية، عاملاً فى تطوير ووضع فيزياء كمٍّ جديدة تصف الاندماج النووى وظاهرة النفق.

هل نحن، مثل طومسون فى الستينيات من القرن التاسع عشر، نخدع أنفسنا بالاعتقاد بأن قوانين الفيزياء كما نفهمها حاليًا مناسبة لحل لغز كيف تعمل الشمس؟ أم

أن علينا، مثل إدينجتون فى العشرينيات من القرن العشرين، أن نتطلع إلى ثورة فى الفيزياء تسمح لنا بتفسير الواقع الذى نراه وهو أن أتون الشمس يعمل بالفعل عند درجة حرارة مختلفة عن تلك التى تقول بها النظرية القياسية؟ أيًا كانت الطريقة، يبدو أن علم الفلك متأكد من أن الشمس أحد مجالات العلم الأكثر إثارة للاهتمام فى عقد التسعينيات، بعد عقود احتل فيها مركز المسرح الفلكى أجسام أبعد بكثير من الشمس وأكثر غرابة بشكل سطحى، مثل البولسار(*)، والنجوم الزائفة أو أشباه النجوم، والثقوب السوداء. إن حكايتى تنتهى هنا، لكن كشف أسرار قلب الشمس الدفين بدأ لتوه.

(*) نَبّع إشعاع لاسلكى فلكى.

ملحق (أ)

أرجوحة العلم

إن دراسات أسرار الشمس تتقدم حاليًا بسرعة، فلقد حدثت تطورات جديدة مهمة، حتى أثناء الشهور التى مرت منذ تسليم المُسوَّدة الأولى لهذا الكتاب إلى المطبعة، وذلك سواء فى مجال رصد النيوترينات الشمسية أو النظريات التى تفسر لماذا لا يتم رصد سوى ذلك العدد القليل جدًا من النيوترينات. إن وزن هذا الدليل الجديد قَلَب ميزان الرأى الخبير بعيدًا عن نموذج الويمب (كما فى بداية ١٩٩١) ولصالح تنويعة من عملية MSW التى وصفت فى الفصل الرابع . هذا التغيير فى موضوع الـ MSW يعتمد على نحو مناسب ، على شيء يُعرف " بعملية الأرجوحة " لتوفير نيوترينات بها كمية ضئيلة من الكتلة.

وفى الوقت الذى تقرءون فيه هذه الكلمات سيكون هناك بكل تأكيد مزيد من التغييرات فى القصة العلمية، وليس لدىَّ هنا أية نية لمحاولة تقديم " إجابة " نهائية لمشكلة النيوترينو الشمسى. إننى أهدف ببساطة وبقدر الإمكان إلى إعطائكم المعلومات المتاحة حتى الوقت الحاضر، بحيث يمكنكم فهم معنى القصص التى من المحتم أن تكون قد ظهرت فى الصحافة والتليفزيون فى عام ١٩٩١ وما بعده. لكن هناك موضوعًا أساسيًا يظل ثابتًا طوال كل ذلك. بالرغم من أن نظرية الويمپ لم تعد المرشح الرئيسى لتفسير الألغاز التى تطرحها قياسات النيوترينو الشمسى، فإنه لا يزال واضحًا أن هناك ارتباطًا بين ما يدور داخل الشمس وطبيعة الكون بصورة عامة - بل قد تقدم لنا

الدراسات الشمسية مفتاح حل لغز الطريقة الصحيحة لتطوير نظرية موحدة للفيزياء ، التى أشرنا إليها باختصار فى الفصل الثامن .

لقد كان ديفيز على حق

بدون عمليات رصد جديدة ما كان هناك بالطبع أساس يُعتمد عليه لبناء نظريات جديدة . إن التطور المثير فى قصة النيوترينو الشمسى خلال التسعينيات من القرن العشرين يرجع إلى أنه بعد عقدين من الاعتماد على بيانات من تجربة واحدة فقط، توافر لدى المنظّرين فجأة نتائج رصد من أربعة مكشافات للنيوترينو الشمسى. والنتيجة الأخيرة لعمليات الرصد الجديدة هى أن راى ديفيز كان على حق منذ البداية ـ فهناك بالفعل عدد قليل جدًا من النيوترينات القادمة من الشمس، وأن الأمر لا يرجع إلى عيب فى مكشافه لكونه لم ير المزيد من النيوترينات. لكن، يتوافق مع قصة الدراسات الشمسية ككل الزاخرة بالأحداث ، أن عمليات الرصد الجديدة لم تؤكد فقط القياسات التى قام بها ديفيز إنما طرحت على المنظرين المزيد من التعقيدات التى تتعين مناقشتها. وكما قال جون بَكُول John Bahcall فى مؤتمر عُقد فى ديسمبر ١٩٩٠، "إن هذا الموضوع كان سيصبح أبسط بكثير لو لم تكن هناك تجارب لا بد من القلق بشأنها".

يستخدم اثنان من المكشافات الجديدة تقنية الجاليوم التى وصفت فى الفصل الرابع. أحد هذين المكشافين، المسمى SAGE (اختصارًا لتجربة الجاليوم السوفيتية الأمريكية) يقع فى القوقاز ، والمكشاف الآخر ، المعروف باسم GALLEX (اختصارًا لتجربة الجاليوم) ، هو مشروع أوروبى يقع فى نفق جران ساسو تحت جبال الألب . وطبقًا للنموذج القياسى المزدوج (النموذج القياسى للفيزياء الفلكية زائد النموذج القياسى للفيزياء النووية) ، فإن على هاتين التجربتين رصد عدد قليل من النيوترينات الشمسية ذات الطاقة المنخفضة . وبحلول نهاية عام ١٩٩٠، لم يكن هناك دليل على أن أيًا منهما رصد أية نيوترينات شمسية على الإطلاق. لقد كان الغياب التام للنيوترينات الشمسية ذات الطاقة المنخفضة بمثابة مفاجأة، وكان لا يمكن تفسيرها بمجرد تعديل نماذج الفيزياء الفلكية. وكما صاغها بكول، فإما أن يكون النموذج القياسى للفيزياء خاطئًا أو أن تجارب الجاليوم ببساطة لم تعمل.

والمكشاف "الجديد" الآخر هو تجربة كاميوكند Kamiokande التى ناقشتها سابقًا. لقد بدأت هذه التجربة فى مراقبة النيوترينات الشمسية فى عام ١٩٨٨، وبحلول

عـام ١٩٩٠ كان قد تجمع لديها كَمٌّ من البيانات يكفى لتوفير قاعدة لمقارنات إحصائية مع قياسات التجربة الرابعة ، تجربة ديفيز القديمة الأمينة فى هومستاك Homestake فى داكوتا الجنوبية . ولقد وفرت المقارنة للمنظرين مجالاً شاسعًا لاستخدام خيالهم.

إن الأنباء الطيبة، بالطبع ، هى أن مكشاف كاميوكند لم يسجل فقط عددًا منخفضًا من النيوترينات؛ لكنه أوضح لنا أيضًا الاتجاه الذى "رأى" أن النيوترينات قادمة منه ، مؤكدًا إنها بحق نيوترينات شمسية . والمزيد من الأنباء المختلطة هو أنه بعد أكثر من اثنى عشر يومًا من التشغيل، ومباشرة خلال قمة آخر دورة نشاط للشمس، ظل عدد النيوترينات المرصودة فى كاميوكند ثابتًا، مع عدم وجود أى أثر للارتباط مع بقع الشمس الذى تمت مشاهدته فى بيانات داكوتا الجنوبية. إن بكول، المنظر الذى أمضى حياته يفكر بعمق فى مشكلة النيوترينات الشمسية، مقتنع بأن الارتباط الظاهرى بين النيوترينات التى رصدها ديفيز وبقع الشمس مجرد صدفة. لكن، كما سأشرح باختصار، لا يزال منظرون آخرون يستخدمون هذا الارتباط، الذى يعتقدون أنه حقيقى، لتنقيح النسخ الخاصة بهم لعملية الـ MSW ـ كما أن ديفيز نفسه لم يقر بعد بالهزيمة ولم يدفع كل ما عليه فى رهانه مع بكول !

ومع ذلك، فإن أهم نتيجة استُخلصت من المقارنة بين بيانات كاميوكند وبيانات تجربة ديفيز واضحة ومحددة. إن مكشاف كاميوكند يسجل فى المقام الأول وصول النيوترينات التى يتم إنتاجها فى عملية البورن ـ ٨ . وبتفسير عدد هذه النيوترينات، طبقًا للنظرية الفيزيائية القياسية، نعلم عدد النيوترينات التى يتعين على الشمس إنتاجها خلال العمليات المختلفة والمتعددة التى تجرى فى قلبها، ويستطيع بكول حساب عدد النيوترينات التى يجب أن يتم رصدها بواسطة تجربة ديفيز، مفترضًا أن النظرية النووية القياسية صحيحة. لقد ثبت فى النهاية أن حتى هذا الرقم يساوى ضعف عدد النيوترينات الشمسية التى رصدتها بالفعل تجربة ديفيز . لكن الحساب لا يتضمن قط أية افتراضات خاصة بالفيزياء الفلكية. إذًا ضم البيانات الواردة من داكوتا الجنوبية إلى البيانات الواردة من كاميوكند، يخبرنا بشكل لا لبس فيه أن النظرية القياسية للفيزياء النووية خاطئة. وبالطبع لا بد أن يكون النموذج القياسى للفيزياء الفلكية خاطئًا أيضًا، لكن نستطيع على الأقل أن نأمل فى حل كل اللغز بمجرد العثور على نظرية أفضل للتفاعلات النووية. وهنا تأتى آلية الأرجوحة.

يوم مشهود للمنظرين

إن بيانات كاميوكند الجديدة قيدت بشكل حاسم المدى الممكن لتغيرات MSW التى تستطيع أن تحل مشكلة انخفاض عدد النيوترينات الشمسية المرصودة على الأرض. لنتذكر، إن عملية الـ MSW الأساسية تتضمن نوعًا واحدًا من النيوترينو، ينتج فى قلب الشمس، ويتغير إلى نوع آخر من النيوترينو ("يتذبذب") وهو فى طريقه عبر الشمس إلى خارجها . إن كلاً من مكشاف ديفيز ومكشاف كاميوكند لم يرصدا سوى نوع النيوترينات المرتبطة بالإلكترونات ، وهو بالفعل نوع النيوترينات الناتجة عن التفاعلات النووية التى تحافظ على الشمس ساخنة . لكن أسرة الجسيمات التى ينتمى إليها الإلكترون والليبتونات ، تضم عضوين آخرين، هما جسيمات التوو والميو . ولن تسجل المكشافات أية نيوترينات إلكترونية تتحول إلى نيوترينات توو أو نيوترينات ميو وهى فى الطريق إلينا ، ومع ذلك فإن العدد الإجمالى للنيوترينات ظل هو نفسه .

فى مكشاف كاميوكند، تُسجل النيوترينات الشمسية القادمة عندما تتفاعل مع الإلكترونات فى خزان المياه الذى يشكل معظم المكشاف. ولا يوجد فى المواد العادية أية جسيمات توو أو ميو ، وبالتالى لا يوجد فى الماء شىء لكى تتفاعل معه نيوترينات التوو أو نيوترينات الميو؛ لذلك فإنها تمر عبر المكشاف وكأنه غير موجود هناك . لكن عندما تتفاعل النيوترينات الإلكترونية مع الإلكترونات ، فإن الأخيرة ترتد من جراء الضربة ، ويمكن إذًا قياس كل من اتجاه وطاقة الإلكترونات الناتجة السريعة الحركة بواسطة مكشافات تبطن جدران خزان المياه . وكما سبق أن ذكرت، فإن اتجاه الارتداد يخبرنا أن النيوترينات التى تضرب الإلكترونات قادمة من الشمس . وتخبرنا قياسات الطاقة بمقدار الطاقة التى تحملها هذه النيوترينات معها من قلب الشمس إلى خارجها وعبر الفضاء وصولاً إلى الأرض . إن معلومات الطاقة هى التى تقيد بقسوة الاحتمالات المسموح بها بالنسبة لنموذج MSW.

إن عمليات الرصد الأخيرة تبين ، بشكل خاص ، أن تدفق النيوترينات القادمة من الشمس يُكبت بالتساوى عند كل مستويات الطاقة التى تم قياسها حتى الآن . وتستطيع النيوترينات أن تتذبذب فقط بالطريقة المطلوبة شريطة أن تكون لها كتلة، وتتوقف طبيعة عملية التذبذب على فرق الكتلة بين نوعَى النيوترينو اللذين تشملهما الذبذبة. وتنص النظرية على إنه إذا كان هذا الفرق فى الكتلة كبيرًا نسبيًا، فإن النيوترينات ذات

الطاقة العالية هى التى ستفضل أن تتحول ، بينما النيوترينات ذات الطاقة الأقل ستظل دون تغيير . من ناحية أخرى ، إذا كان فرق الكتلة صغيرًا جدًا ، فإن النيوترينات ذات الطاقة المنخفضة هى فقط التى ستتحول ، بينما تظل النيوترينات ذات الطاقة الأعلى دون تغيير. إن "طيف" طاقة النيوترينات الإلكترونية التى وصلت كاميوكند استبعدت الاحتمال الأول، كما أن تحليلات أكثر دقة للقياسات استبعدت عددًا وافرًا من الاحتمالات الأخرى، تاركة فقط مدًى صغيرًا جدًا من خواص النيوترينو التى يمكن أن تسمح لذبذبات MSW أن تؤثر على النيوترينات الإلكترونية التى تترك قلب الشمس، بالطريقة الصحيحة التى تفسر كلاً من بيانات كاميوكند ونتائج هومستاك.

طبقًا لهذا التغيير فى موضوع MSW فإن كبت النيوترينات الإلكترونية يحدث أساسًا عند مستويات الطاقة المنخفضة ، أقل من عتبة الرصد فى كل من مكشافات هومستاك وكاميوكند، فى حين أن الكبت الذى تم قياسه فعليًا هو جزء صغير فقط مما يجرى . ويعنى ذلك أن الفرق فى الكتلة بين النيوترينات الإلكترونية والأنواع الأخرى من النيوترينو التى يشملها التذبذب صغير جدًا ـ حوالى واحد على ألف من الإلكترون فولت . وسيكون للنيوترينو الإلكترونى نفسه عندئذ ، طبقًا للنظرية ، كتلة أيضًا أقل من واحد على ألف من الإلكترون فولت ، والتى هى أقل من واحد على مليار من كتلة الإلكترون .

إن السبب وراء الإثارة الكبيرة التى شعر بها المنظرون بشأن ذلك هو أنه كان لديهم من قبل نظرية تتنبأ بكتل للنيوترينو فى ذلك النطاق . لقد سبق أن اقترح العديد من المنظرين آلية الأرجوحة منذ عام ١٩٧٩، بما فى ذلك موراى جلمان Murray Gell-Mann الحائز على جائزة نوبل. وذلك كجزء من إحدى المحاولات العديدة لتطوير نظرية موحدة كبرى، أى مجموعة واحدة من المعادلات الرياضية لوصف سلوك القوى الثلاث التى تعمل على المقياس الخاص بالجسيمات ما دون الذرية، ألا وهى القوة الكهرومغناطيسية والقوة النووية القوية والقوة النووية الضعيفة. وطبقًا لكل هذه النظريات المتعلقة بالتوحيد الكبير، تصبح كل قوة من القوى الثلاث مكافئة للأخرى عند الطاقات العالية جدًا. والطاقة الحرجة التى يحدث ذلك عندها يمكن التعبير عنها ككتلة. إن صيغة الأرجوحة تعطى كتلة نوع معين من النيوترينو بقيم كتلة الليبتون المرتبط به، مقسومة على كتلة التوحيد الكبرى.

إن كتلة التوحيد الكبرى ضخمة جدًا، وتقدم النظريات المتعددة تقديرات مختلفة اختلافًا طفيفًا، لكنها جميعًا تدور حول١٠^١٥ مليار إلكترون فولت ، وهى تساوى١٠^١٥ مرة كتلة البروتون . إن كتل النيوترينو التى برزت من معادلة الأرجوحة بالنسبة لأخف نوعَى النيوترينو، تتراوح بين واحد على ألف إلكترون فولت وأقل من واحد على مليون إلكترون فولت . وهكذا يكون الفرق أيضًا بين الكتلتين حوالى واحد على ألف إلكترون فولت ، وهو صحيح تمامًا ليتفق مع الجزء الصغير الوحيد من نظرية MSW الذى لا يزال قابلاً للتطبيق فى ضوء بيانات كاميوكند. إن ذلك يثير إمكانية قياس كتلة النيوترينو بدقة من خلال دراسات الشمس ، واستخدام عمليات الرصد تلك الخاصة بالفيزياء الفلكية، وإدراجها فى معادلة الأرجوحة ، لنكتشف بدقة ماهية الكتلة الموحدة الكبرى ، وكيف يمكن تجميع نظرية موحدة كبرى دقيقة .

روابط كونية ـ وكلمة تحذير

لقد أحيت هذه الفورة من الإثارة بشأن عملية MSW مفهوم أن النيوترينات يمكنها أن توفر المادة المعتمة التى يحتاجها الكون ليتماسك معًا. فى عام ١٩٩٠ أجرى دنيس سكياما Dennis Sciama وهو عالم فيزياء فلكية بريطانى مقره تريست فى إيطاليا، بعض الحسابات التى تربط بين تأثير الـ MSW وعملية الأرجوحة، واللغز القديم العهد الخاص بطبيعة سحب الهيدروجين فى الكون. ويتلخص اللغز فى أن ذرات الهيدروجين مزودة بالطاقة، بحيث ينبعث منها ما يُعرف بإشعاع ليمان ـ ألفا. من السهل تزويد الهيدروجين بالطاقة باستخدام الضوء فوق البنفسجى، لكن من أين يأتى الضوء فوق البنفسجى؟

يرى سكياما أن الإشعاع يمكن أن يكون قادمًا من موت النيوترينات الثقيلة التى خُلقت فى الانفجار العظيم، وانحلَّت مع تقدمها فى العمر. ويقول سكياما إن نيوترينات توو يمكنها أن تقوم بالمهمة، إذا كانت كتلتها حوالى ٢٩ إلكترون فولت ومتوسط عمرها النصفى١٠^١٦ سنة تقريبًا. إذا قرر سكياما تحديد كتلة نوع من النيوترينو، فإنه يستطيع حساب كتل النوعين الآخرين من النيوترينو من معادلات الأرجوحة. ويصل ذلك، طبقًا لنسخة سكياما، إلى قيمة أعلى بالكاد من واحد على ألف إلكترون فولت، وهو ما يتفق تمامًا مع الحسابات المعتمدة على نظرية MSW الخاصة بتذبذبات النيوترينو الشمسى، إلا أن ذلك ينطبق على نيوترينات الميو، وليس على النيوترينات الإلكترونية. فى هذه

الصورة، يكون للنيوترينو الإلكترونى كتلة أصغر، حوالى واحد على مائة مليون إلكترون فولت. وهناك عدد كبير جدًا من النيوترينات التوو حولنا، ويُعتقد إنه يمكن اعتبارها مسئولة عن المادة المعتمة التى نوقشت فى الفصل الخامس، حتى لو كانت كتلة كل واحد من هذه النيوترينات لا تتجاوز ٢٩ إلكترون فولت.

لقد أشار سكياما نفسه إلى أن فكرته "تربط معًا ثلاث فرضيات غير مثبتة: آلية الأرجوحة، وتأثير MSW وفرضية انحلال النيوترينو"، لكنه عندما يفعل ذلك يصل إلى "نموذج متماسك". إذا استمرت المكونات الثلاثة للمخطط فى تشكيل وحدة متماسكة مع ظهور مزيد من الأدلة، فإن ذلك سيمثل تطورًا مثيرًا حقًا.

لكن قد تكون الإثارة سابقة لأوانها. فبرغم كل شىء، يرتكز كل ذلك، حتى الآن، على دليل "سلبى". لم يقم أحد فعليًا برصد إيجابى لتأثير MSW فعال. بدلاً من ذلك، استبعدت التجارب فعليًا أغلب مجال تأثيرات MSW التى تم التنبؤ بها. إن المتحمسين للنظرية سيقولون بالطبع إنه باستبعاد المستحيل، لا بد أن يكون ما يتبقى صحيحًا. غير أن الرؤية البديلة قد تكون أنهم يتشبثون بمنفذ صغير جدًا تركته لهم التجارب القائمة، ومن الجائز تمامًا أن يجدوا أن عمليات الرصد الجديدة عندما تصل تكون قد جرفت آخر أثر لنظرية MSW.

وجدير بنا أن نتذكر أن قبول نظرية MSW وآلية الأرجوحة يعنى التخلى، مثلاً، عن تفسير كتل النيوترينو التى اقترحها تحليل كَوْسِيك Cowsik لنيوترينات السوبرنوفا. وإذا أخذت قياسات تبين، كما فعلوا، أن طيف طاقة النيوترينات الشمسية لم يتشوه، فمن المبرَّر تمامًا الجدل بأن التشوه لا بد أنه يجرى عند مستويات طاقة منخفضة حيث لا يمكن حتى مشاهدته، لكن هل نفترض فقط أننا نأخذ القياسات الفعلية كقيمة ظاهرية؟ إذا كان شكل طيف طاقة النيوترينو غير مشوه فعلاً، فإن ذلك ما قد تتوقعه تمامًا لو كان نقص عدد النيوترينو ناتجًا فعليًا من عيوب فى النموذج القياسى للفيزياء الفلكية، ولا علاقة له بتذبذبات النيوترينو على الإطلاق!

إن الصورة بعيدة عن أن تكون واضحة، وتتجه إلى التغيير مجددًا عندما تنتج التجارب الجديدة مزيدًا من البيانات. وهناك نظريات أخرى تحاول حل اللغز عن طريق فيزياء غير قياسية (مثل، احتمال ذبذبات مرتبطة بخواص مغناطيسية مفترضة للنيوترينات)، ولا يزال فى الانتظار العديد من التنويعات الأكثر أو الأقل جنونًا بشأن

موضوع الفيزياء الفلكية. وطبقًا لأحد التفسيرات لآخر بيانات الموجة الصوتية الشمسية، فقد تكون هناك عمليتان منفصلتان تعملان داخل الشمس، وتتداخلان مع تدفق النيوترينات الخارجة من قلب الشمس.

علم الزلازل الشمسية، وبقع الشمس والذبذبات

كما هو متوقع، وفرت التقنية الجديدة لسبر داخل الشمس بدراسة الطريقة التى يتحرك بها سطحها إلى الداخل والخارج، تبصُّرًا جديدًا لكيفية عمل الشمس. يبدو أن نموذج ذبذباتها يتغير على امتداد دورة النشاط الشمسى التى تُقدر تقريبًا بإحدى عشرة سنة، ويعبر علماء الفلك عن تفاؤلهم بأنه خلال السنوات القليلة القادمة قد يكشف ذلك عن الأسباب الأساسية لهذه الدورة.

لقد تم تحديد هوية الذبذبات التى تشمل كل سطح الشمس، والناجمة عن موجات صوتية مرتدة هنا وهناك داخل الشمس، منذ دورة شمسية واحدة مضت، أى فى عام ١٩٧٩. وتبين الدراسات التى قام بها فريق باحثين من جامعتَىْ برمنجهام وشيفيلد بوليتكنيك، والتى أعلنت عام ١٩٩٠ أن هناك تغيرات فى السلوك التفصيلى لبعض تلك الموجات الصوتية الشمسية ترتبط بتغيرات فى النشاط الشمسى مُقاسًا بعدد بقع الشمس. إن التغيرات المكتشفة حديثًا فى الموجات الصوتية، تتطابق مع تغير الزمن الذى تستغرقه لعبور الشمس. ويُقدر التغير على امتداد الدورة الشمسية بحوالى ثانية واحدة، وطبقًا للباحثين، فإن ذلك يمكن أن ينتج من تغير فى حجم طبقة الشمس التى تتحرك الموجات خلالها، أو من تغير فى سرعة الصوت فى الجزء المَعنىّ من الشمس (ربما سببه تغير فى درجة الحرارة).

لكن، أى جزء من الشمس يتأثر بهذه الطريقة؟ بالرغم من أن عمليات الرصد تلك تغطى دورة كاملة لبقع الشمس، فإن هذه الدراسة الخاصة لم تقدم معلومات عن العمق الذى تنفذ إليه هذه الموجات. غير أنه، فى دراسة أخرى أُعلنت فى العام نفسه، وصف باحثون من مرصد بيج بير Big Bear الشمسى بكاليفورنيا، قياسات مختلفة قليلاً من الذبذبات الشمسية، ستقدم معلومات عن عمق النفاذ.

وترتبط أيضًا التغيرات فى سلوك هذه الموجات بعدد بقع الشمس، وإن كانت البيانات قد امتدت فقط للفترة من ١٩٨٦ إلى ١٩٨٨. وترى هذه القياسات أن التغيرات

تقع فى طبقة رقيقة من سطح الشمس، لا تغطى سوى واحد فى المائة من نصف قطر الشمس.

قال دوجلاس جوخ Douglas Gough من جامعة كمبريدج، معلقًا على هذه الاكتشافات الجديدة، إنه بالرغم من أن التقريرين، بتعبير ضيق، يتناولان نوعين مختلفين من الموجات، "فمن المرجح تمامًا أن يكون للتغيرات فى التردد أصل مشترك". إن التغيرات فى سلوك موجات الصوت الشمسية عبر دورة بقع الشمس ترتبط ارتباطًا وثيقًا بتغير النشاط المغناطيسى للشمس، وطبقًا لجوخ فإن المزيد من التحليلات الدقيقة والبارعة قد توفر قريبًا معلومات عن العمليات الديناميكية المتمركزة على عمق أكبر والمسئولة عن كل نشاط الدورة الشمسية بالكامل. وفى غضون ذلك، كان المنظرون سريعين فى محاولة ربط هذا التغير المكتشف حديثًا للموجات الصوتية الشمسية عبر دورة بقع الشمس، مع الدليل الوارد من مكشاف هومستاك بأن عدد النيوترينات الشمسية التى تصل الأرض يختلف أيضًا عبر الدورة الشمسية. قد يكون بكول مقتنعًا بأن الربط بين بقع الشمس والنيوترينات الشمسية غير منطقى، لكن منظّرين آخرين، مثل راى ديفيز، ليسوا متأكدين من ذلك.

ومع حلول نهاية عام ١٩٩٠ قدم باحثون من جامعة ديلاوير Delaware ومن جامعة ولاية أوهايو تحليلاتهم، التى ترى أن هناك حقًا ارتباطًا قويًا بين عدد النيوترينات وعدد بقع الشمس. إلا أن هذه التحليلات تتجاوز الدراسات السابقة، باكتشاف أن الارتباط يكون أكثر وضوحًا عند إدخال ظروف التغير الموسمى فى الحسابات، وبالتالى يستطيعون تفسير كيف يمكن أن يحدث ذلك، طبقًا لطبيعة مدار الأرض حول الشمس.

إذا كانت هناك علاقة بين عدد بقع الشمس وتدفق النيوترينو، فلا بد أن يرجع ذلك إلى أن كلاً من النيوترينات والبقع تتأثر بالتغيرات الجارية تحت سطح الشمس. إن المرشح الأرجح للتأثير على كل منهما هو المجال المغناطيسى المتغير للشمس، الذى يتغير هو ذاته على امتداد دورة النشاط التى تُقدر تقريبًا بأحد عشر عامًا. إذًا، يمكن تفسير تأثير النيوترينو بناء على التأثير المغناطيسى على النيوترينات. وطالما أن النيوترينات لديها كمية ضئيلة من المغناطيسية (وهو محض تخمين، ولم يتم قياسه أبدًا)، فإن بذبات مماثلة جدًا لتلك الخاصة بعملية MSW يمكن أن يسببها مجال مغناطيسى اخل الشمس عند تحرك النيوترينات خلالها وهى فى طريقها إلى الخارج. وبما أن

قوة المجال المغناطيسى تتغير عبر الدورة الشمسية، فإن قوة الذبذبة ستتغير أيضًا، وبناء عليه سيتغير عدد النيوترينات الإلكترونية التى ستظل فى قيد الحياة حتى تصل إلى مكشاف هومستاك. لكن ذلك ليس سوى جزء من القصة.

إن علماء الفلك لديهم دليل قوى على أن المجال المغناطيسى للشمس ملتف فى شكل حلقى، مثل حلقة كعكة مُحلاَّة، تحت سطح الشمس مباشرة. ولدوران الشمس تأثير على هذا المجال المغناطيسى بحيث يعطيه شكلاً لولبيًا؛ مما يجعله أقوى عند المناطق البعيدة عن خط الاستواء. ومن ثَم يجب أن يكون تأثير التذبذب، طبقًا لهذه النظرية، اقل بالنسبة للنيوترينات التى تعبر إلى الخارج مباشرة من القلب عبر خط استواء الشمس، ويكون أكثر قليلاً بالنسبة للنيوترينات التى تخرج من القلب بزاوية مع خط استواء الشمس وتنبثق شمال هذا الخط أو جنوبه.

إن الأرض ذاتها ليست دائمًا على المسافة نفسها من الشمس، فهى ترتفع أيضًا أعلى وأسفل مستوى خط استواء الشمس فى دورانها حول مدارها. وينشأ ذلك لأن مدار الأرض إهليلجى، وليس دائريًا تمامًا، فهو مائل بشكل طفيف. ويحدث أن نكون أقرب قليلاً للشمس فى ديسمبر عنه فى يونيو، لكننا نعبر مستوى خط الاستواء فى كل من ديسمبر ويونيو، وهما الشهران اللذان يسجل فيهما بالفعل مكشاف هومستاك أغلب النيوترينات. وتبلغ الأرض أكبر مسافة لها أعلى وأدنى خط استواء الشمس فى سبتمبر ومارس، وهما بالتحديد الشهران اللذان يكون فيهما تدفق النيوترينات عند أقل مستوى له. ويشير فريق الباحثين إلى أنه، طبقًا لنظرية MSW يجب أن يصل بالفعل عدد أكبر من النيوترينات الإلكترونية إلى الأرض عندما تكون فى الوضع الأقرب إلى الشمس، أى فى ديسمبر ويونيو، غير أن ذلك تحديدًا نقيض التأثير الصغير الذى قاموا بقياسه. بالأخذ بالقيمة الظاهرية، يستبعد الارتباط بين بقع الشمس والنيوترينو عملية MSW كتفسير لندرة النيوترينات الشمسية!

إن العلاقة مع علم الزلازل الشمسية تأتى من دراسة قام بها لورنس كروس Lawrence Krauss من جامعة يل Yale . لقد وجد ما أسماه تلميحات "مُحيرة"، ويشير إلى أن تغيرات النيوترينو وتغيرات الموجة الصوتية تتحرك فى تناغم وثيق مع بعضها البعض، وهو ما قد يعنى أن كلاً منهما يتأثر مباشرة بالتغيرات نفسها المتمركزة فى عمق الشمس. إن التغير فى الزمن الذى تستغرقه الموجات الصوتية لعبور الشمس،

خلال الدورة الشمسية، يمكن تفسيره إذا كانت سرعة الصوت داخل الشمس تتغير، وإحدى طرق إنجاز ذلك أن يكون هناك مجال مغناطيسى لولبى كبير يقع عميقًا داخل الشمس، وتتغير قوته خلال الدورة الشمسية ويؤثر على كل من النيوترينات والموجات الصوتية. إن مثل هذا المجال المغناطيسى سيؤثر على الموجات الصوتية لأن الجسيمات المشحونة كهربيًا فى داخل الشمس ستمارس "ضغطًا" مغناطيسيًا إضافيًا، وكذلك وزن الطبقات الخارجية للشمس. فى الواقع، يستطيع المجال المغناطيسى القوى المتمركز عميقًا داخل الشمس أن يكون أيضًا طريقة أكثر فاعلية من مجال مغناطيسى قرب السطح، لجعل النيوترينات المغناطيسية تتذبذب، كما يمكنه أن يقلب نيوترينات إلكترونية إلى نوع ما آخر، حتى وإن كان لديها قدر أقل بكثير من المغناطيسية التى تتطلبها النسخة البديلة من هذه النظرية.

عودة إلى المستقبل

إن الوقت مبكر جدًا للقول ما إذا كان هذا النهج لتناول المشكلة سينتج رؤى جديدة لكشف أسرار الشمس. لكن فريق ديلاوير/أوهايو ذكر بطريقة عَرَضيَّة تلميحًا مثيرًا للاهتمام والفضول، فى بحث نُشر فى مجلة نيتشر بعدد نوفمبر ١٩٩٠ قد يقود إلى تناول مثمر لعقد التسعينيات من القرن العشرين. إنهم يشيرون إلى أن التأثير المغناطيسى الذى وصفوه ليس قويًا بما فيه الكفاية، بأية حال، لتفسير المستوى المنخفض عمومًا للنيوترينات الشمسية التى تصل إلى الأرض. غير أنه يستطيع أن يفسر على نحو بارع جدًا لماذا يكون عدد النيوترينات المرصودة أكبر فى بعض الأوقات من العام وفى بعض أوقات الدورة الشمسية - لكن فقط إذا كان هناك شىء آخر قد خفض من قبل تدفق النيوترينات إلى أقل من نصف الكمية التى تنبأ بها النموذج القياسى المزدوج. ويقولون: "إن حلاً شاملاً للغز النيوترينو الشمسى يتطلب شيئًا بالإضافة إلى فرضية عزوم النيوترينو المغناطيسية"، وهذا الشىء قد "يتجلى فى شكل تغيير للنموذج القياسى للشمس، أو ربما فى شكل التوليف بين فرضية العزم المغناطيسى وتأثير MSW.

لا يمكن لحبكة الرواية أن تكون أكثر إبهامًا. قد يكون تأثير MSW قريبًا من الحقيقة، أو قد يستبعده الجيل التالى من المكشافات. لقد بَهَتتْ نظرية الويمب وتراجعت عن موقعها فى مقدمة السباق، لكن لا يزال لديها فرصة تصل إلى ٥٠٪

لتوفير جزء من الإجابة (إن هذه النسبة أوردها جيم ريتش، من ساكلاى، فى فرنسا، فى ديسمبر ١٩٩٠). قد يكون هناك ارتباط بين تدفق النيوترينو وعدد بقع الشمس وقد لا يكون، وهذا الارتباط إذا وجد فقد يخبرنا أن النيوترينات مغناطيسية أو قد لا يخبرنا.

ومع ذلك لا تجعلوا هذا التشوش يثبط همتكم. لقد كان الأمر كذلك دائمًا فى علم الفلك. ففى أول الأمر، عندما يتم إجراء عمليات رصد جديدة، يكون هناك وفرة من الأفكار المربكة التى تُقدم لتفسيرها، وفى كثير من الأحيان تكون هذه الأفكار متناقضة. لقد حدث ذلك مع الكُوازار(*) والبولسار(**) وحتى مع اكتشاف مجرات أخرى أبعد من درب اللبانة. ويُعتبر الارتباك، فى أفضل الأحوال، علامة على أن دراسة ما يدور داخل الشمس، وليس فقط على سطحها، يصبح فعليًا فرعًا حقيقيًا من فروع العلم، تغذيه عمليات الرصد والتجارب. كان إحساسى الشخصى، فى نهاية عام ١٩٩٠ أنه من غير المرجح أن يثبت أى من مجموعة الأفكار الأخيرة إنه الحل الوحيد لمشكلة النيوترينو الشمسى. لا يوجد حتى الآن أية عملية رصد مباشرة لأى تأثير فعال لعملية MSW لا يمكن تفسيره بطريقة أخرى، كما لم يتم حتى الآن، فى تجربة على الأرض، أى كشف إيجابى للويمب. فى نهاية المطاف، قد يكون الأمر أننا نحتاج إلى فيزياء جديدة كما نحتاج إلى نموذج شمسى أفضل من أجل تفسير كل الألغاز. إن التوليف بين بعض الأفكار الموجودة، وعمليات منفصلة فعالة كابتة لتدفق النيوترينو من قلب الشمس وتعمل على تعديله فى الطبقات الخارجية، ربما سوف يثبت بالفعل إنه ناجح على المدى البعيد. أو ربما ستقودنا المكشافات الجديدة، التى بدأ حاليًا تشغيلها، إلى نظرية جديدة تمامًا لحل المشكلة، وهو ما يمثل، بطرق عديدة، الاحتمال الأكثر إثارة على الإطلاق.

أيًا كان ما سيحدث خلال السنوات العشر القادمة، فإن شيئًا واحدًا يبدو أكيدًا. كلما درس علماء الفيزياء أسرار الشمس، وخاصة ندرة النيوترينات الشمسية، بدا واضحًا أن حل هذه الألغاز سيتضمن عالم المتناهى الصغر وعالم المتناهى الكبر. لقد انبثق آنفًا التبصُّر فى كل من القوانين التى تحكم الجسيمات ما دون الذرية والمادة التى تجعل الكون يتماسك معًا من دراسات لنجم عادى متوسط الحجم، وإذا كان علماء

(*) نقطة إشعاع خارج المجرة. (المترجم).

(**) نبع إشعاع راديو فلكى. (المترجم).

الفيزياء سيتوصلون أبدًا إلى " نظرية كل شىء" التى طالما جَدُّوا فى طلبها، فلا بد، بكل تأكيد، أن تلائم هذه النظرية ثروة المعلومات الواردة الآن عن سلوك الشمس ونيوترينااتها. عندما اقترح جون بكول وراى ديفيز فى أول الأمر، فى عام ١٩٦٤، تجربة لمراقبة النيوترينات الشمسية، لم يدخل أبدًا فى رأسيهما، على حد قول بكول، إنه يمكنك استخدام الشمس لاكتشاف أشياء جديدة خاصة بفيزياء الجسيمات. لكن قد يصبح ذلك هو التراث الباقى والأكثر أهمية للعقود التى أمضاها ديفيز وزملاؤه نصُون ذرات الأرجون، فى خزان مملوء بسائل تنظيف مدفون فى منجم ذهب فى اكوتا الجنوبية.

ملحق (ب)

رابطة السوبرنوفا(*)

ليس مقدَّرًا لشمسنا أن تصبح سوبرنوفا. لكنها وُلدت من حطـــام انفجـــارات سوبرنوفا فى الماضى البعيد، عندما كانت مجرتنا، مجرة درب اللبَّانة، حديثة السن. إن كل ذرة فى جسمك، وكل ذرة على الأرض، فيما عدا الهيدروچين والهليوم(**) صنعت داخل النجوم ثم قُذف بها فى الفضاء بواسطة انفجارات السوبرنوفا؛ لكى تشد وتربط معًا سُحُب الهيدروچين والهليوم التى تكونت منها الشمس وأسرتها من الكواكب. وإذا لم نفهم السوبرنوفا؛ فقد لا نفهم أصل الشمس (ولنترك جانبًا أصلنا نحن ذاتنا)، وستكون القصة التى رويتها فى هذا الكتاب ناقصة.

على امتداد العقود الثلاثة الماضية، طور المنظرون ما بدا أنه فهم مُرْضٍ لانفجارات السوبرنوفا، اعتمادًا على فهمهم لقوانين الفيزياء، وعلى عمليات رصد لمثل تلك الانفجارات فى مجرات بعيدة، ولحطام من انفجارات سوبرنوفا قديمة فى مجرتنا ذاتها، وعلى نماذج الكمبيوتر لكيفية عمل النجوم، مثل تلك التى وصفتها سابقًا. لكن حتى عام ١٩٨٧، لم يكن لديهم الوسائل للتحقق مباشرة من هذا الفهم. ولذلك كان انفجار نجم يُعرف باسم ساندوليك (Sanduleak) – ٦٩° ٢٠٢ ليصبح سوبرنوفا،

(*) نجم متفجر فائق التوهج، تزيد درجة سطوعه مائة مليون مرة عن درجة سطوع الشمس. وهو ظاهرة نادرة الرصد.

(**) لا يوجد فى جسمك هليوم.

ومشاهدة ذلك من الأرض فى ليلة ٢٤/٢٣ من فبراير ١٩٨٧، ربما أهم حدث تقريبًا فى علم الفلك منذ اختراع التلسكوب. والحدث، الذى لُقِّب بـ SN1987A (إشارة إلى أول سوبرنوفا يتم رصدها فى عام ١٩٨٧)، وقع فى السحابة الماجَّلانية الكبيرة، وهى مجرة قريبة جدًا من مجرتنا، وتنتمى إلى نفس نظام المجرات التى تتماسك معًا بواسطة قوة الجاذبية والمعروفة بالمجموعة المحلية. ويعتبر السوبرنوفا SN1987A الذى وقع على مسافة ١٦٠ ألف سنة ضوئية (وهو ما يمثل بالمقاييس الكونية البيت المجاور) أقرب سوبرنوفا حدث منذ عام ١٦٠٤، عندما انفجر فى مجرتنا ذاتها آخر سوبرنوفا معروفة، وكان ذلك قبل تطوير التلسكوب الفلكى مباشرة. لقد كان السوبرنوفا قريبًا بما يكفى لدراسته بالتفصيل بواسطة مجموعة من المعدات ـ تتضمن التلسكوبات التقليدية على قمم الجبال، وأجهزة الرصد التى تعمل بالأشعة السينية على متن الأقمار الصناعية فى الفضاء، وأجهزة رصد النيوترينو المدفونة على عمق كبير تحت سطح الأرض. وعلى امتداد العامين اللذين أعقبا الانفجار، أثبتت تلك المشاهدات سواء على مستوى الخطوط العريضة أو على مستوى أغلب التفاصيل، أن علماء الفلك كان لديهم بالفعل فهم جيد لكيفية عمل السوبرنوفا. ومع أن بعض التفاصيل لا تتفق مع التوقعات، فلم تكن هناك مفاجآت كبيرة. يبدو أننا بالفعل نفهم من أين أتت المادة التى تكونت منها الشمس ونحن أنفسنا، ويبدو من المناسب كذلك الاحتفال بنقطة التحول تلك فى علم الفلك، وذلك بالنظر إلى سوبرنوفا ١٩٨٧ بقدر أكبر من التفصيل قبل أن أنهى هذا الكتاب.

اكتشاف سوبرنوفا

إن قصة سوبرنوفا ١٩٨٧ بدأت، بمعنى ما، منذ ١٩٦٠ ألف عام مضت، عندما كان كوكب الأرض يعانى من العصر الجليدى قبل الأخير. فطالما أن النجم الذى انفجر يقع على بعد ١٦٠ ألف سنة ضوئية، فإن ذلك يعنى أن الضوء استغرق كل هذا الوقت ليصل إلى الأرض. لكن بقدر ما يتعلق الأمر بسكان هذا الكوكب، فإن القصة تبدأ ليلة ٢٤/٢٣ من فبراير ١٩٨٧، عندما كان الفلكى الكندى الشاب، إيان شيلتون (Ian Shelton)، يُجْرى عمليات رصد من مرصد لاس كامباناس، على قمة جبل فى شمال شيلى. وكان شيلتون يستخدم تلسكوبًا متواضعًا بالمعايير الحرفية ـ تلسكوب فتحته عشر بوصات فقط. وكان قد حصل لتوِّه على إذن باستخدام هذا الجهاز فى استطلاع السحابة الماجلانية

الكبيرة، بحثًا عن النجوم المتغيرة، وهى نجوم تتغير درجة سطوعها من يوم لآخر، أو من أسبوع إلى الأسبوع التالى، أو من شهر إلى الشهر الذى يليه، أو على امتداد مقاييس زمنية أطول. إن علماء الفلك المحترفين نادرًا ما «ينظرون عبر» تلسكوباتهم هذه الأيام، بصرف النظر عن مجموعة التكنولوچيا الإلكترونية التى يمكنها الحصول على معلومات من ضوء النجوم، فإن الصورة الضوئية المتواضعة يمكنها أن تكشف أكثر مما تستطيع العين البشرية أن تراه، لأنه يمكن تعريضها للضوء لمدة طويلة (ساعات فى بعض الأحيان) بحيث تتكون الصورة طوال ذلك الوقت. إن العين البشرية، بعد التحديق فى نجم لساعات، لن تستطيع رؤية ما يزيد عمًا ستراه من أول نظرة خاطفة.

التقط شيلتون أول شريحة فوتوغرافية للسحابة الماجلانية الكبيرة فى ليلة ٢٢/٢١ من فبراير، غير أن اللقطة كانت رديئة، لأنه لم يكن اعتاد بعد على النظام. وفى ليلة ٢٣/٢٢ من فبراير، قام بالعمل بشكل أفضل، وحصل على شريحة معقولة للسحابة الماجلانية الكبيرة مستخدمًا زمن تعريض للضوء قدره ساعة. لقد اكتسبت هذه الصورة أهمية كبيرة لأنها آخر صورة التُقطت للمنطقة بهذا الجهاز قبل أن تصبح السوبرنوفا مرئية.

وفى ليلة ٢٤/٢٣ من فبراير، قام شيلتون بتشغيل كل شىء بدقة، وحصل على فترة تعريض طويلة وجيدة، ثلاث ساعات انتهت فى الساعة الثانية وأربعين دقيقة صباحًا. وكان يستعد للنوم، راضيًا عن العمل الذى تم إنجازه بشكل طيب - لكنه قرر تحميض الشريحة الفوتوغرافية أولاً. وبمجرد أن قام بذلك، لاحظ بقعة ساطعة، تبدو كأنها نجم، بينما لم تكن هناك عندما صور المنطقة نفسها الليلة الماضية. فى البداية، ظن أن هناك عيبًا فى الشريحة، ولكنه تنبه بعد ذلك إلى أن أى نجم ساطع بتلك الدرجة يمكن رؤيته بسهولة بالعين المجردة. وخرج مسرعًا خارج مبنى التلسكوب ليلقى نظرة. وكان النجم الجديد بالفعل هناك.

وفى تلك الليلة نفسها، قرب منتصف الليل، كان أوسكار دوهالد، أحد العاملين فى التلسكوب ذى الأربعين بوصة المجاور، قد خرج ليلقى نظرة حول المكان. وكان يعرف السماوات الجنوبية جيدًا، حيث تُعد مجرة السحابة الماجلانية الكبيرة سمة ظاهرة لها. ولاحظ أن هناك نجمًا جديدًا فى تلك المجرة، لكنه لم يلفت نظر المراقبيْن اللذين يستخدمان التلسكوب للظاهرة. إلا أن شيلتون من جانبه أسرع لكى يطلع زملاءه على اكتشافه. وذهب إلى غرفة التحكم الخاصة بتلسكوب الأربعين بوصة، وسألهم عن مدى

سطوع نجم جديد عند رؤيته من مسافة مجرة السحابة الماجلانية الكبيرة. رغم أن النجم الجديد ليس شائعًا بأية حال، فإنه حدث فلكى يكاد يكون روتينيًا، عندما يمر نجم عبر طور غير مستقر ويتوهج فجأة ساطعًا لوقت قصير. إنه فى الحقيقة ليس بنجم جديد، ولكنه نجم قديم سطع فجأة بما يكفى لتتم ملاحظته. وقال الباحثون الأكثر خبرة، الذين يستخدمون تلسكوب الأربعين بوصة لشيلتون، إن مثل هذا النجم الجديد قد يصل إلى حوالى ٨ على مقياس السطوع الفلكى المعيارى (الذى يدل فيه الرقم «الأصغر» على سطوع النجم بشكل أكبر). وعلق شيلتون بأنه لأمر مثير، لأنه قام بتصوير نجم فى مجرة السحابة الماجلانية الكبيرة قوة سطوعه ٥. عندئذ قال بارى مادور على الفور لا بد إنه سوبرنوفا ـ وعند هذه النقطة من الحديث ذكر أوسكار دوهالد أنه رأى هو أيضًا نجمًا جديدًا ساطعًا فى مجرة السحابة الماجلانية الكبيرة تلك الليلة، وخرج الجميع لإلقاء نظرة – لكن، ولسخرية القدر، كان لا يمكنهم فعل شىء لدراسة الظاهرة فورًا، فالسوبرنوفا كان يقع عند مستوى منخفض جدًا فى السماء بحيث لا يمكن دراسته بواسطة التلسكوب ذى المائة بوصة الموجود فى الموقع، بينما كان تلسكوب الأربعين بوصة مزودًا تلك الليلة بجهاز يُستخدم لدراسة الأجسام الباهتة، وهو جهاز حساس بحيث قد يؤدى توجيهه إلى السوبرنوفا إلى إحراقه تمامًا فى أقل من ثانية.

كل ما كان فى إمكانهم عمله هو تنبيه باقى علماء الفلك ـ غير أن القيام بذلك من فوق قمة جبل فى شيلى ليس بالأمر السهل. وبعد محاولات غير مثمرة للاتصال هاتفيًا بالمكتب المركزى للاتحاد الفلكى الدولى فى كمبريدج بمساتشوستس، نزل مندوب من الجبل ليرسل تلك الأنباء بالتلكس من أقرب مدينة. ووصل التقرير فعلاً إلى كمبريدج قبل التقرير الثانى عن الاكتشاف بنصف ساعة، وبهذا الهامش، تم الاعتراف رسميًا بشيلتون ودوهالد كمكتشفَى السوبرنوفا.

ولقد سبَّب الاكتشاف إثارة هائلة وسط علماء الفلك، وانتقل إلى الصحافة وكان موضوع غلاف مجلة «تايم» فى عدد ٢٣ من مارس ١٩٨٧. ويرجع السبب فى هذه الإثارة جزئيًا إلى أهمية السوبرنوفا فى حد ذاته ـ إنه أكبر الانفجارات التى وقعت منذ «الانفجار العظيم» الذى ولد منه الكون، ومصدر كل العناصر الثقيلة ـ بالإضافة لندرته. ففى مجرتنا، تم رصد أربعة انفجارات سوبرنوفا فقط على امتداد الألف عام الماضية،

وكان آخر تلك الانفجارات التى يمكن رؤيتها بالعين المجردة قد وقع فى مجرة أندروميدا (Andromeda) التى تبعد عنا بمسافة مليونَىْ سنة ضوئية (أبعد بعشرة أضعاف من سوبرنوفا ١٩٨٧)، وكان قد تم رؤيته فى عام ١٨٨٥.

انفجارات عنيفة من الماضى

بدأت دراسة السوبرنوفا، فى سديم العصور القديمة، بسجلات لما أسماه علماء الفلك الصينيون بالـ «نجوم الضيوف»، فى القرون التى سبقت ميلاد المسيح. بالطبع لم يكن يعرف هؤلاء الفلكيون ما الذى يرونه. لكنهم كانوا يعتبرون أن ظهور نجوم «جديدة» فى السماء له دلالة كبيرة، واحتفظوا بسجلات لها. لكن للأسف، ليس من السهل دائمًا حل شفرة هذه السجلات. إن بعض الأجسام التى سُجلت على أنها نجوم ضيوف قد تكون نجومًا جديدة أقل إثارة، وليست سوبرنوفا، وقد يكون بعضها نوعًا مختلفًا تمامًا من الظواهر (نيازك ربما). لكن أول إشارة معروفة للسوبرنوفا هى كلام منقوش على قطعة عَظْم يرجع تاريخه إلى ١٣٠٠ قبل الميلاد، ويسجل ظهور نجم ساطع من لا مكان قرب نجم نسميه أنتار (Antares).

ويرجع أول تحديد غير مبهم لهوية السوبرنوفا إلى ١٨٥ سنة بعد الميلاد، فهو يصف سطوع النجم وأفوله البطىء حتى يعود إلى الإظلام بشكل لا يترك مجالاً للشك بخصوص تحديد هويته. وعلى امتداد الألف عام التالية، سجل مراقبو السماء الصينيون خمسة سوبرنوفا فى مجرتنا، مجرة درب اللبانة، وقد أشار إلى بعضها مراقبون فى أجزاء أخرى من العالم، بما فى ذلك اليابان، مصر، واحتمالاً فى الأمريكتين. وكان لآخر سوبرنوفا تأثير كبير على علم الفلم الحديث - تأثير كبير، بالفعل، أكبر من أى شىء آخر خارج نظامنا الشمسى.

فلقد توهج السوبرنوفا فى السماء يوم ٤ من يوليو ١٠٥٤، وتألق فى تجمع نجوم برج الثور، وسُجلت آلام احتضار نجم يبعد عنا ست آلاف سنة ضوئية. ورغم أن المراقبين اليابانيين والصينيين سجلوا الحدث، إلا أنه لا يوجد ما يثبت أن معاصريهم الأوروبيين فعلوا ذلك، مع أن النجم كان مرئيًا من أوروبا. ومما يثير الدهشة، أن سكان أمريكا الأصليين سجلوا ذلك السوبرنوفا فى شكل صور على الجدران الصخرية فى أريزونا - ولو أنهم ما كانوا ليعرفوا المعنى الذى سيكتسبه يوم ٤ من يوليو فى هذا الجزء من العالم بعد ذلك بقرون قليلة.

ولأن ذلك السوبرنوفا كان حديثًا وقريبًا جدًا، بالمفهوم الفلكى، فقد ترك خلفه كتلة متوهجة من الغاز يمكن دراستها بشكل تفصيلى كبير بواسطة التلسكوبات الحديثة، وفى قلب هذه السحابة نجم كثيف نيترونى القلب وسريع الدوران حول نفسه، قابل للرصد كبولسار (نبع إشعاع لاسلكى فلكى) عند ترددات لاسلكية، فى الضوء المرئى، وحتى باستخدام معدات الأشعة السينية. إن هذه السحابة السديمية السرطانية (سُميت كذلك لأن خطوطها الخارجية فى بعض الصور الفلكية تشبه السرطان - إذا كان عندك خيال قوى) تمثل عمليًا معملاً للفيزياء الفلكية، وموقعًا على عتبتنا الفلكية يمكن من خلاله رصد ومراقبة العديد من الظواهر واختبار عدة نظريات. إن دراسة هذه السحابة مهمة جدًا، لدرجة أن علماء الفلك يطلقون مُزحة تقول إنه يمكن تقسيم الجانب الرصدى إلى جزءين متساويين تقريبًا - دراسة السحابة السديمية السرطانية، ودراسة أى شىء آخر.

منذ عام ١٠٥٤، تم رصد حفنة من السوبرنوفا، ولم ينشط الأوروبيون فى هذا المجال إلا فى عام ١٥٧٢. وقد حدث وشوهد آخر سوبرنوفا فى درب اللبانة فى عام ١٦٠٤. ورغم أن يوهانز كيبلر (Johannes Kepler) درس هذا السوبرنوفا بالتفصيل، فإن سجلاته اعتمدت بالكامل على مشاهدات وعمليات رصد بالعين المجردة، وإنه لأمر محبط بالنسبة لعلماء الفلك فى الوقت الحالى. لقد تمت رؤية السوبرنوفا من الأرض قبل خمس سنوات من أول مرة استخدم فيها جاليليو التلسكوب لدراسة السماء. وقبل اختراع التلسكوب الفلكى، كان معدل انفجار السوبرنوفا فى مجرتنا الذى يمكن رؤيته من الأرض، حوالى أربعة انفجارات كل ألف عام تقريبًا. لكن الصدفة العمياء أتاحت ظهور سوبرنوفا «مرتين» فى مدى عمر إنسان، وذلك بين عامَىْ ١٥٧٢ و١٦٠٤. لكن فى الفترة الممتدة من ١٦٠٤ إلى ١٩٨٧، وبينما تنتظر التلسكوبات فريستها، كان السوبرنوفا الوحيد الذى شوهد بالعين المجردة ذلك الذى وقع فى مجرة أندروميدا، على بعد مليونَىْ سنة ضوئية، وأمكن رؤيته من الأرض فى نهاية القرن التاسع عشر. ويفسر ذلك الإثارة الكبيرة التى أحدثها سوبرنوفا ١٩٨٧ وسط علماء الفلك، فرغم أنه لم يكن فى درب اللبانة وإنما فى المجرة المجاورة مباشرة، إلا أنه كان مرئيًا بالطبع للعين المجردة، وأمكن دراسته تفصيلاً بشكل غير مسبوق بواسطة كل الأدوات والمعدات الموجودة حاليًا التى أُضيفت إلى تلسكوب جاليليو البسيط.

العودة إلى الحاضر

الأنباء التى تلقاها مكتب الاتحاد الدولى للفلك فى كمبريدج بعد نصف ساعة فقط من التلكس الذى ورد من شيلى كانت من عالِم الفلك النيوزيلندى، ألبرت جونز، الذى حدد مكان سوبرنوفا ١٩٨٧ فى تلك الليلة. لكن ثبت فى النهاية أن أهم تلك المشاهدات قام بها علماء فلك التقطوا صورًا روتينية للسحابة الماجلانية الكبيرة، وذلك حتى قبل رؤية السوبرنوفا. لقد صور روبرت مكنوت، فى أستراليا، النجم الساطع قبل تحديد هويته كسوبرنوفا بحوالى ١٦ ساعة، واستخدم فى ذلك كاميرا فلكية كبيرة تُعرف باسم تلسكوب شميت - لكن لم يتم تحميض الصور ودراستها إلا بعد ورود الأنباء من شيلى إلى أستراليا. وبعد حوالى ثلاث ساعات ونصف الساعة فقط، كان اثنان من علماء الفلك فى نيوزيلندا يجربان قطعة توجيه جديدة على تلسكوب، وحدث أن اختارا السحابة الماجلانية الكبيرة كهدف لصورهم التجريبية. ومع المشاهدات التى حدثت فى شيلى الليلة السابقة ظهر السوبرنوفا للعيان فجأة، وساعدت هذه الصور على تحديد توقيت الحدث، والسرعة التى توهج بها فجأة النجم السالف، ساندوليك - ٦٩° ٢٠٢. وهى المرة الأولى التى أمكن فيها تحديد هوية النجم الذى أصبح سوبرنوفا على لوحات فوتوغرافية قديمة، بحيث نعرف بعض التفاصيل عن كينونته وماذا كان يفعل قبل أن يتوهج فجأة.

ولقد ساعد ذلك كله الفلكيين على اختبار نظرياتهم عن كيفية عمل السوبرنوفا، ويرجع تاريخ الرؤية النظرية الرئيسة إلى عام ١٩٣٤، أى ما يزيد على نصف قرن. فى ذلك الوقت، بعد اكتشاف النيوترون بأقل من عامين قدم والتر باد (Walter Baade) وفريتز زويسكى (Fritz Zwicky) الافتراض المثير القائل بأن «السوبرنوفا يمثل الانتقال من نجم عادى إلى نجم نيوترونى»، ورغم أن نصف قرن من التنظير والمشاهدات ورصد للسوبرنوفا البعيد قد أضاف الكثير إلى تفاصيل الكيفية التى يحدث بها ذلك الانتقال، إلا أنه لا يمكن اختبار النظريات بشكل كامل إلا بدراسة سوبرنوفا قريب أثناء عمله.

وبحلول نهاية الثمانينيات، كان علماء الفلك مقتنعين، من خلال دراستهم للسوبرنوفا فى المجرات الأخرى، بأن هناك نوعين أساسيين ومختلفين من السوبرنوفا، فى كل منهما يتحول نجم عادى بالفعل إلى نجم نيوترونى، ويطلق على طول الطريق طاقة جاذبية من المخزون المتوافر لديه منها، مثلما قدَّر وليم طومسون ذلك بالضبط. وتُعتبر

فيزياء القرن التاسع عشر كافية لتفسير الطاقة المنطلقة فى السوبرنوفا ـ لو كنت تعلم بوجود نجوم نيوترونية. إن الفرق بين السوبرنوفا والآلية التى افترضها طومسون للحفاظ على الشمس ساخنة هو أولاً فرق مقياس ـ حيث يتضمن تكوُّن نجم نيوترونى من نجم عادى انهيارًا مفاجئًا ومثيرًا بحيث ينجم عن الطاقة المنطلقة أكبر انفجار منذ «الانفجار العظيم»، الذى أسفر عن ميلاد الكون. إن كتلة المادة التى يحتويها النجم النيوترونى تساوى تقريبًا كتلة شمسنا، إلا أنها متكدسة فى حجم يماثل حجم جبل على الأرض. وسيتكون مثل هذا النجم من كتلة أية مادة لم تعد تحتفظ بحرارتها الناجمة من الاندماج النووى فى قلبه (نجم ميت)، شريطة أن تكون كتلتها أكبر قليلاً من الكمية الحرجة (أكبر قليلاً من كتلة شمسنا)، عندما تقهر قوة سحب الجاذبية للداخل القوى التى تعطى الذرات تركيبها. وإذا كانت الكتلة أكبر «بكثير» من ذلك، فإن حتى النيوترونات تنسحق من الوجود بواسطة قوة الجاذبية، وتحول النجم الميت إلى ثقب أسود. وبالتالى، فإن كتل النجوم النيوترونية المستقرة تتراوح فقط بين أكبر قليلاً من كتلة شمسنا وحوالى ضعف كتلة الشمس.

الطريقة الأولى لتكوُّن سوبرنوفا (النوع الأول): إذا كسب نجم بارد ميت، كتلته «أقل» من الكتلة الحرجة، مادة من نجم مرافق. إن مثل هذا الجم ينشأ كقَزَم أبيض، أى نجم ميت تساوى كتلته كتلة شمسنا تقريبًا، وربما أقل قليلاً. أما حجمه فيساوى حجم الأرض. إن ذلك هو مصير شمسنا أن تنهى حياتها كقَزَم أبيض، لأن كتلتها لا تكفى لتجعل منها نجمًا نيوترونيًا وليس لديها أى رفيق تسرق كتلة منه. لكن إذا أصبح نجم مثل شمسنا قزمًا أبيض ودار فى مدار حول نجم آخر فإن بإمكانه أن يكسب كتلة، وذلك بسحب غازات من رفيقه عبر قُوَى المد والجَزْر وابتلاعها. وعندما تصل كتلة إلى القيمة الحرجة، تنهار الذرات المتكون منها النجم، وتندمج الإلكترونات مع البروتونات لتصبح نيوترونات. أما النجم، الذى تزيد كتلته على كتلة شمسنا، فإنه سينكمش من حجم الأرض إلى حجم جبل، ويطلق فى هذه العملية الكمية المناسبة من طاقة الجاذبية.

لكن ليس ذلك ما حدث مع سوبرنوفا ١٩٨٧، فهناك طريقة أخرى لتكوين سوبرنوفا، تُعرف بالنوع الثانى. وطبقًا للنظرية، يحدث ذلك بالنسبة للنجوم ذات الكتلة الكبيرة جدًا، قرب نهاية حياتها، عندما ينفد الوقود النووى اللازم للحفاظ على حرارة قلبها. وينهار تمامًا الجزء الداخلى لمثل هذا النجم، والذى كتلته أكبر من الكتلة الحرجة

اللازمة للحصول على نجم نيوترونى، ويصل عندئذ إلى حالة النجم النيوترونى، دون التوقف عند حالة القزم الأبيض. وبالمقارنة، فإن قدرًا أكبر من الطاقة ينطلق فى ثوانٍ قليلة، ويعادل على الأقل مائة ضعف الطاقة التى تشعها شمسنا طوال حياتها، وتنفجر الطبقات الخارجية للنجم نحو الخارج بسرعة ٢٠ ألف كم/ث (فى حالة سوبرنوفا ١٩٨٧ كانت السرعة بالفعل ١٧ ألف كم/ث) وتنطلق موجة من التفاعلات النووية لتنتج عناصر ثقيلة لا يمكن أن تتكون طبيعيًا بطريقة أخرى.

إن هذا الوصف العام لنوعَى السوبرنوفا يمكن، مثل أغلب التعريفات البسيطة، إدخال تحسينات عليه وتقسيمه إلى فئات أصغر. وقد قسم الخبراء كل فئة رئيسة إلى فئتين فرعيتين على الأقل. لكن ذلك ليس مهمًا الآن. إن الذى يهم هو أن سوبرنوفا ١٩٨٧ كان من النوع الثانى للسوبرنوفا، الذى يمثل أكثر أنواع الأحداث النجمية طاقة على الإطلاق. ولأن علماء الفلك تمكنوا من تحديد هوية النجم السالف، فإن بإمكانهم إعادة بناء تاريخ ذلك السوبرنوفا ابتداء من وقت مولد النجم وحتى الأحداث المثيرة التى تم رصدها فى عام ١٩٨٧.

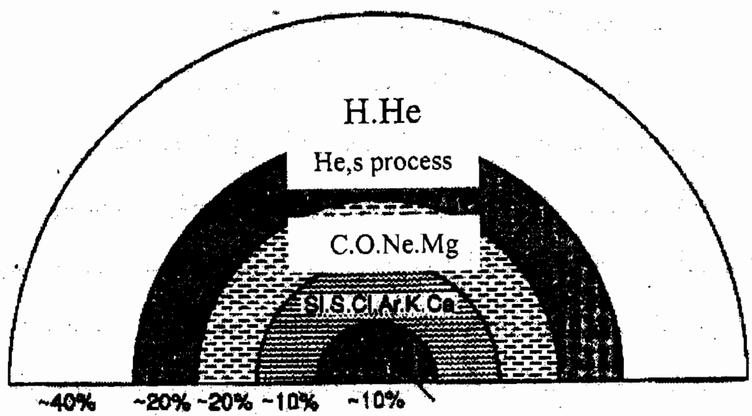
لقد أُعيد تركيب هذه القصة، بالطبع، بمساعدة نماذج الكمبيوتر الخاصة بكيفية عمل النجوم التى سبق ذكرها من قبل. لقد طور علماء مختلفون نماذج مختلفة قليلاً فيما بينها تقول مجموعة من القصص المختلفة بعض الشىء، غير أن الخطوط العريضة متماثلة دائمًا، وتعتمد الخطوط العريضة التى أعرضها هنا على نماذج استخدمها خبير السوبرنوفا ستان ووسلى (Stan Woosly) وزملاؤه. ويعمل ووسلى فى جامعة كاليفورنيا، سانتا كروز، (التى كان يعمل بها چون فولكنر). وكان ووسلى قد روى حكايته مع السوبرنوفا بقدر من التفصيل فى عدد أغسطس ١٩٨٩ من مجلة ساينتفيك أمريكان (Scientific American). وطبقًا لهذا النموذج، فإن النجم الذى يعنينا وُلد منذ حوالى ١١ مليون عام، فى منطقة بالسحابة الماجلانية الكبيرة غنية بالغاز والغبار بشكل خاص. ولأن النجم يحتوى على مادة تبلغ ١٨ ضعف كمية المادة الموجودة فى شمسنا، كان عليه أن يحرق وقوده النووى بسرعة أكبر لكى يولِّد حرارة تكفى ليتماسك فى مواجهة سَحْب قوة الجاذبية الذى يعمل نحو الداخل. وبالتالى نفد وقوده بشكل أسرع من وقود نجم كتلته مثل شمسنا، مما يجعله يضىء بشكل أكثر سطوعًا ٤٠ ألف مرة من الشمس. وفى غضون عشرة بلايين عام، كان هذا النجم قد حرق كل الهيدروچين الموجود فى قلبه

وحوله إلى هليوم. ونتيجة لذلك، انكمش القلب ببطء وأصبح أكثر سخونةً حتى يمكن أن يبدأ احتراق الهليوم.

وخلال ذلك الطور من حياته، يصبح مثل هذا النجم ذو الكتلة الكبيرة نجمًا عملاقًا أعظم، حيث تتضخم طبقاته الخارجية وتتمدد عبر مسافة تساوى تقريبًا قطر مدار الأرض حول الشمس. ومن بين المفاجآت التى وجدها علماء الفلك عند فحصهم للصور القديمة للنجم ساندوليك ـ ٦٩° ٢٠٢، سلف سوبرنوفا ١٩٨٧، إن هذا النجم لم يكن بالفعل عملاقًا أعظم أحمر لكن عملاقًا أعظم أزرق، وهو نوع من النجوم أصغر حجمًا وأسخن بعض الشىء. لقد انكمشت الأجزاء الخارجية للنجم بعض الشىء مرة أخرى، وربما حدث ذلك قبل الانفجار بأربعين ألف عام. إن ذلك لا يؤثر على الفهم الأساسى للنوع الثانى من السوبرنوفا، وإن كان يعطى المنظرين كمية كبيرة من التفاصيل المثيرة التى يتعين عليهم بحثها وتفسيرها. ويوجد حاليًا تفسير مفصل يقول، إن ذلك الانكماش المتأخر للجزء الخارجى للنجم يرجع إلى حقيقة أن السحابة الماجلانية الكبيرة تحتوى على كميات متواضعة نسبيًا من العناصر الأثقل من الهليوم، على نقيض مجرتنا – مجرة درب اللبانة. أحد هذه العناصر المفتقدة فى نجوم السحابة الماجلانية الكبيرة هو الأكسچين، الذى يساعد على انتفاخ العملاق الأعظم الأحمر، لأن الكمية الضئيلة من الأكسچين فى الجزء الخارجى من النجم تمتص الإشعاع الذى يحاول الهروب، وتمسك به فى الداخل مما يجعل النجم ينتفخ كالبالون. ومع وجود كمية أقل من الأكسچين، فإن «البالون» ينكمش مرة أخرى، عند بلوغ هذا النجم مرحلة تطوره حيث ينخفض قليلاً تدفق الإشعاع نحو الخارج. وأثناء استمرار احتراق الهليوم، من المحتمل أن النجم كان عملاقًا أعظم أحمر، لكن احتراق الهليوم يمكن أن يطيل بقاء النجم لفترة لا تتجاوز مليون عام فقط بعد انتهاء احتراق الهيدروچين فى قلب هذا النجم.

وفى السنوات الأخيرة من حياة ساندوليك – ٦٩° ٢٠٢، والتى امتدت لبضعة آلاف من السنين، لا بد أنه استهلك إمكاناته الباقية لإنتاج الطاقة بسرعة متزايدة. إن الكربون، الذى هو نفسه ناتج عن احتراق الهليوم، قد تحول إلى خليط من النيون والماغنسيوم والصوديوم، و«احترق» النيون والأكسچين بدورهما (والأكسچين نتاج آخر لعملية احتراق الهليوم)، وفى النهاية استهلكت تفاعلات الاندماج النووى السيليكون والكبريت فى قلب النجم، بينما كانت كل أنواع الوقود النووى الأخرى تحترق فى

الطبقات الأبرد على التوالى فى الاتجاه إلى الخارج انطلاقًا من المركز (شكل١، ب). وطوال الفترة، تزداد سرعة التغير. وطبقًا للحسابات التى أجراها ووسلى وزملاؤه، يدوم احتراق الهليوم حوالى مليون عام، بينما لا يدوم احتراق الكربون سوى ١٢ ألف عام فقط، أما النيون فيحتفظ بالنجم ساخنًا لمدة ١٢ عامًا، ويوفر الأكسچين الطاقة الضرورية لمدة أربع سنوات، فى حين يحترق السليكون تمامًا فى أسبوع واحد، وعندئذ تبدأ الأمور فى أن تصبح مثيرة بالفعل.



شكل (١ – ب): تركيب نجم ثقيل مثل سلف السوبرنوفا ١٩٨٧، قبل أن ينفجر مباشرة. القلب الغنى بالحديد مستعد للانهيار، وعمليات الاندماج المختلفة التى تم وصفها فى النص تحدث جميعًا فى مختلف الطبقات عبر النجم، خارج القلب، وعند درجات حرارة أقل فى كل طبقة متتالية.

الموت والمجد

يُعتبر احتراق السيليكون نهاية السلسلة حتى بالنسبة لنجم ذى كتلة كبيرة، لأنه ينتج خليطًا من الأنوية، تتضمن الكوبلت والحديد والنيكل، وهى من بين أكثر الترتيبات التى يمكن للبروتونات والنيوترونات أن تكونها استقرارًا. تنطلق طاقة من عملية التصاق الأنوية الأخف وزنًا لتكوين نواة حديد (طالما تم التغلب على الحاجز الكهربى بين تلك الأنوية). لكن التصاق أنوية الحديد مع أنوية أخرى لتكوين عناصر أثقل وزنًا يستنفد الطاقة، بالإضافة إلى الطاقة اللازمة للتغلب على الحاجز الكهربى. تستطيع العناصر الأثقل أن تنشطر فعلاً لتكوين أنوية مثل أنوية الحديد، ومن ثَم تنطلق طاقة فى هذه العملية. هناك نوع من الوادى الطبيعى للطاقة بالنسبة للأنوية، حيث يحتل الحديد قاع

هذا الوادى فى حين تقع العناصر الخفيفة أعلى أحد جانبيه، أما العناصر الأثقل فتقع أعلى منحدره الآخر. و«تفضل» كل الأنوية أن تتدحرج إلى أسفل الوادى وتصبح حديدًا، العناصر الخفيفة عبر طريق الاندماج والعناصر الثقيلة عبر طريق الانشطار. وبهذا المعنى يكون الحديد والنيكل أكثر استقرارًا. إذًا، من أين جاءت العناصر الأثقل من الحديد (الرصاص واليورانيوم وكل العناصر الأخرى)؟ أتت هذه العناصر من السوبرنوفا مثل سوبرنوفا ١٩٨٧. ورغم أن هذه المقولة اعتمدت على حسابات علمية أُجريت قبل فبراير ١٩٨٧، فإن دراسات السوبرنوفا ١٩٨٧ قد أثبتت صحتها.

فى الواقع، هناك نوعان من العناصر لا يمكن إنتاجها داخل النجوم المستقرة. لا بد أن تكون أخف العناصر (الديوتريوم، الهليوم - ٣، ليثيوم، بيريليوم والبورون) قد أتت من مكان آخر، قبل تكوُّن أول النجوم. ذلك «المكان الآخر» لا يمكن إلا أن يكون الانفجار العظيم، الذى ولد منه الكون. ويتم استنباط النموذج القياسى للكون عند بداية تكوينه بالرجوع بالتمدد المرصود حاليًا للكون إلى الخلف زمنيًا (فى خيالنا، وبمساعدة نماذج الكمبيوتر). إذا فعلنا ذلك، مثلما فعل جامو (Gamow)، فإننا نصل إلى «لحظة الخلق»، منذ حوالى ١٥ مليار عام، عندما كانت الكثافة لا نهائية. ولنترك جانبًا المعنى الدقيق لتلك اللانهائية، فإن علماء الكوزمولوجيا يمكنهم وصف كيف نشأ الكون ابتداء من الثوانى القليلة التى أعقبت لحظة خلقه، وذلك اعتمادًا على المعلومات المستمدة من فهمهم لفيزياء الجسيمات، وعلى وصف الكون المستمد من نظرية النسبية العامة.

فعندما كان «عمر» الكون حوالى ٢٥ ثانية، كانت درجة الحرارة حوالى أربعة مليارات درجة مئوية، وكثافة الطاقة طنين لكل لتر تقريبًا. وكانت كرة الغاز، التى هى الكون، تتكون أساسًا من نيوترينات وفوتونات، مع آثار فقط من البروتونات والنيوترونات وأزواج الإلكترون - بوزيترون. وكانت كثافة «المادة» تُقدر بعشرة جرامات فقط لكل لتر - عشرة أضعاف كثافة الهواء الذى نتنفسه. عند هذه المرحلة، لا تستطيع البروتونات أن ترتبط كهرومغناطيسيًا مع الإلكترونات لكى تكوّن ذرات هيدروچين مستقرة، لأن الذرات ستتحطم نتيجة إشعاع الطاقة الكثيف. وللسبب نفسه، لا تستطيع البروتونات والنيوترونات أن يتحدا لتكوين أنوية ديوتريوم.

لكن عندما بلغ عمر الكون دقيقة، كان قد تمدد وبرد بما يكفى لكى تتكون أنوية ديوتريوم. وأطلق ذلك سلسلة من التفاعلات النووية، استمرت دقيقتين، وحولت كل

الديوتريوم تقريبًا إلى هليوم، وانتجت كميات صغيرة جدًا من عدد قليل من عناصر أخرى خفيفة للغاية.

لكن مع استهلاك كل الديوتريوم، عند ازدياد معدل انخفاض درجة حرارة الكون، تتوقف تفاعلات الاندماج. وبعد ذلك بما يقرب من مائة ألف عام أصبح الكون باردًا (عند درجة حرارة سطح شمسنا تقريبًا) لدرجة أن البروتونات المجردة وأنوية الهليوم ارتبطت مع الإلكترونات لتكوين ذرات.

إن نسبة المادة الأصلية التى تتحول إلى هليوم تتوقف على مدى سرعة تمدد الكون فى مراحله الأولى. ويتوقف ذلك بدوره على عدد أنواع الجسيمات الأولية الموجودة، والطريقة التى تتفاعل بها فيما بينها. ومع الأخذ فى الاعتبار كل هذه العوامل (بما فى ذلك آخر إثبات بأن هناك ثلاثة أنواع فقط من النيوترونات)، فإن النموذج القياسى يقول لنا إن حوالى ٢٣٪ من المادة فى الكون فى مراحله الأولى قد تمت معالجتها لتتحول إلى هليوم. ومما يثبت بشكل جلى صحة النموذج القياسى للانفجار العظيم، حقيقة ما نراه من أن كتلة النجوم القديمة تتكون بنسبة ٢٥٪ من الهليوم - وهو نموذج يأخذ فى اعتباره وجود كميات صغيرة من الليثيوم والعناصر الخفيفة الأخرى فى كوننا.

إذًا، مصدر العناصر الأخف هو الانفجار العظيم، أما كل العناصر الأخرى وصولاً إلى الحديد فيمكن إنتاجها داخل النجوم ذات الكتل الكبيرة. ويستطيع المنظّرون فى مجال فيزياء الجسيمات، اعتمادًا على دراسات زملائهم التجريبيين، أن يفسروا أيضًا كيف يمكن أن يتم إنتاج عناصر أثقل من الحديد، شريطة أن تكون الأنوية سابحة فى بحر من النيوترونات. وينتج السوبرنوفا النيوترونات بوفرة - مع أن هناك فى الواقع، عمليات ألطف بكثير تعمل أيضًا على تحويل العناصر الأخف كتلة فى الكون إلى عناصر أثقل.

ويتم إنتاج أغلب العناصر الأثقل من الحديد، وكذلك بعض نظائر العناصر الأقل كتلة منه، عندما تقتنص الأنوية الناتجة من عمليات الاندماج النووى نيوترونات من محيطها داخل النجم. لكن أى نيوترون حر يكون فى حد ذاته غير مستقر، وإذا تُرك لدقائق قليلة فإنه يتحول إلى بروتون بعد أن ينبعث منه إلكترون نتيجة انحلال بيتا. وبالتالى، يتعين أن تكون النيوترونات الداخلة فى عمليات القنص تلك قد انطلقت حديثًا من تفاعلات نووية أخرى. وهو ما لا يمثل مشكلة داخل أى نجم يستمر الاحتراق النووى

داخله. فعلى سبيل المثال، فى كل مرة تندمج نواة ديوتريوم ونواة تريتيوم لإنتاج نواة هليوم - ٤، ينطلق نيوترون، وتوفر هذه التفاعلات وغيرها كمية كبيرة من النيوترونات داخل النجوم ـ حوالى مائة مليون نيوترون فى كل سنتيمتر مكعب من المنطقة المعنية فى النجم. وتستطيع هذه النيوترونات أن تتفاعل مع أنوية أخرى.

إن إضافة نيوترون واحد للنواة يزيد كتلتها بوحدة واحدة، لكنه لا يغير من شحنتها الكهربية أو خواصها الكيميائية ـ وإنما تصبح نواة نظير مختلف للعنصر نفسه، إلا أنه فى العديد من الحالات، يكون النظير المتكون حديثًا غير مستقر، وبعد فترة من الزمن (ثوانٍ قليلة، فى بعض الحالات، وعدة سنوات فى حالات أخرى) سيقذف بإلكترون نتيجة انحلال بيتا، حيث يتحول أحد نيروتروناته إلى بروتون ليصبح عنصرًا مختلفًا. إذًا، يمكن أن تتكرر كل هذه العملية، عندما تأسر النواة نفسها نيوترونًا آخر. هذا البناء التدريجى للعناصر الثقيلة، حيث يتوافر للنواة الوقت للتحول إلى شكل مستقر وسط التفاعلات مع النيوترونات، يُعرف بالعملية البطيئة لأسر النيوترون ويُرمز لها بالحرف "S".

لكن عند توافر عدد كبير من النيوترونات، كما يحدث بالتأكيد أثناء المراحل الأولى للسوبرنوفا نتيجة للتفاعلات المتفجرة التى تحدث آنذاك، تستطيع النواة أن تأسر العديد من تلك النيوترونات الكثيرة المتوافرة قبل أن يُتاح لها الوقت لكى تلفظ إلكترونًا، أو تنحل بأية طريقة أخرى. ويتطلب حدوث ذلك توافر كثافة تُقدر بحوالى ٣٠٠ مليار (٣×١٠^{٢٠}) نيوترون لكل سنتيمتر مكعب من مادة النجم. وعندما تتحقق هذه الكثافة المهولة من النيوترونات ولوقت قصير عند انفجار السوبرنوفا، يحدث تكوُّن سريع لعناصر ونظائر لديها فائض من النيوترونات، وتكون كلها تقريبًا غير مستقرة. وتُسمى تلك العملية بعملية الأسر السريعة للنيوترون ويُرمز لها بحرف "R". وبمجرد أن يتم امتصاص موجة النيوترونات، فإن الأنوية غير المستقرة، والغنية بالنيوترونات ستنحل إلى أنوية مستقرة، بأن تفقد نيوترونات (حيث تحولها إلى بروتونات) وتصبح أشبه ما تكون بالنظائر الناتجة عن العملية البطيئة. ويتم إنتاج العديد من النظائر بالطريقتين (البطيئة والسريعة). غير أن حفنة من الأنوية المستقرة الغنية بعض الشىء بالنيوترونات لا تُنتج إلا بواسطة العملية السريعة لأسر النيوترونات ثم انحلال بيتا اللاحق. ولقد أحصى علماء الفيزياء الفلكية ٢٨ نظيرًا فقط لا يمكن إنتاجها إلا عن طريق العملية البطيئة لأسر النيوترونات وحدها.

فى رسم بيانى يبين عدد النيوترونات فى النواة مقابل عدد البروتونات، تقع النظائر المستقرة فى شريط قُطرى تقريبًا، وعلى طول هذا الشريط يكون عدد النيوترونات فى النواة أكبر قليلاً من عدد البروتونات. وتقع العناصر التى تكونت بالعملية البطيئة لأسر النيوترونات (والتى نتجت عن انحلال بيتا اللاحق لعناصر عملية الأسْر السريعة للنيوترونات) فى مسار متعرج عبر «وادى الاستقرار» هذا. أما النظائر غير المستقرة الناتجة عن العملية السريعة لأسر النيوترونات فتقع بعيدًا على اليمين، فى نصف الرسم الذى يضم أنوية غنية بالنيوترونات، وعند انحلالها تنتقل نحو قاع وادى الاستقرار، «منهمرة» على عناصر الطريقة البطيئة لأسر النيوترونات. (انظر شكل ٢ ـ ب). وتنتهى الطريقتان بعناصر ذات كتلة كبيرة جدًا حيث تنقسم الأنوية، سواء بانحلال ألفا (وتنطلق نواة هليوم) أو بعملية انشطار (وينتج عنه نواتان متساويتان تقريبًا لكل منهما حوالى نصف كتلة النواة التى انشطرت).

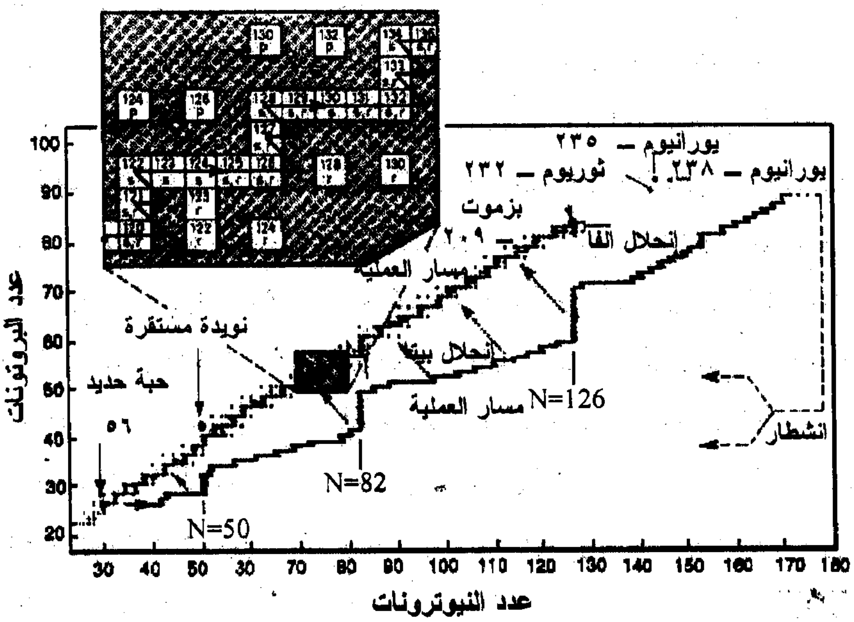
وتُعتبر هاتان العمليتان مفهومتين بشكل جيد جدًا. إن الدراسات الخاصة بطريقة تفاعل النيوترنات مع الأنوية فى تجارب هنا على الأرض، بالإضافة إلى نماذج الكمبيوتر عند الظروف داخل النجوم، تفسر بشكل مُرْضٍ كيف تكونت كل العناصر المعروفة تقريبًا. والاستثناءات الرئيسة لذلك هى بعض النظائر الغنية بالبروتونات، التى يُعتقد أنها تكونت بواسطة عملية أسر للبروتون، وإن كان ذلك ليس مفهومًا بشكل تام. وهناك أيضًا بعض النظائر النادرة التى تنتج فى الفضاء من تفاعلات تدخل فيها الأشعة الكونية. لكن لا يمثل ذلك سوى ظواهر ثانوية. لقد أثبتت الدراسات الخاصة بسوبرنوفا ١٩٨٧ كيف أن علماء الفيزياء الفلكية يفهمون بشكل جيد حقًا طريقة تكون العناصر فى السوبرنوفا، لكننى لا أنوى أن أغوص فى التفاصيل. إن الشىء الرئيس الذى يتعين تذكره هو أن تكوين العناصر الأثقل من الحديد يتطلب «مُدْخل» من الطاقة، وترد هذه الطاقة من انهيار قلب السوبرنوفا نتيجة قوة الجاذبية وتحوله إلى نجم نيوترونى.

السوبرنوفا من الداخل إلى الخارج

باستثناء حالة شمسنا، حيث أمدتنا دراسات النيوترينو بمعلومات مباشرة موثقة عن الظروف فى قلب الشمس، فإننا لا نستطيع أن ندرس بشكل مباشر أيًا من العمليات النووية أثناء تفاعلها داخل النجوم. إن عمليات الرصد التى وفرت المدخلات لنظريات الفيزياء الفلكية الخاصة بالنجوم واختبارات تلك النظريات هى دراسات غير مباشرة

للمادة التى قُذف بها من داخل النجوم. فالمادة يجب أن تُعالج أولا داخل النجم، ثم تُحمل إلى السطح وتُقذف إلى الفضاء، وعندئذ يمكن دراستها من الأرض بالطريقة التى تستند على أن العناصر المنتجة إما أنها تشع الضوء أو تمتصه. إن كل شىء يجب أن ينسجم معًا – ولقد حدث ذلك بالفعل.

ويوضح مثال بسيط ماذا يعنى ذلك. طبقًا لنظرية فيزياء الجسيّمات، يجب أن تحول دورة الكربون ـ النيتروچين (C-N) عنصر الكربون إلى نظير النيتروچين الأكثر انتشارًا،



شكل (٢ – ب) : العمليات البطيئة والسريعة لأسر النيوترونات أثناء عملها. تتكون العناصر الثقيلة المستقرة من الحديد – ٥٦ بواسطة عملية الأسر البطيئة للنيوترونات التى سبق وصفها فى النص. وتقع هذه العناصر على خط قطرى (وادى الاستقرار) فى هذا الرسم البيانى. ويبين الرسم المصغر بالتفصيل العملية البطيئة لأسر النيوترونات، وتكوينها أنوية جديدة بامتصاص نيوترون (متحركة مسافة واحدة نحو اليمين)، ثم تقذف إلكترونًا كما هو مطلوب (متحركة إلى أعلى وإلى اليسار). ويشير العدد فى كل خانة إلى إجمالى عدد الجسيمات (بروتونات+نيوترونات) فى كل نواة. والرمز "S" يشير إلى أن هذا العنصر بالذات يمكن إنتاجه بواسطة العملية البطيئة، والرمز (r) يشير إلى أن هذا العنصر يمكن إنتاجه بواسطة العملية السريعة، والحرف (P) يشير إلى عناصر تكونت بواسطة العملية P التى لا تزال غير مفهومة بشكل جيد.

وعندما يتوافر عدد كبير من النيوترونات، فى انفجار السوبرنوفا، تتكون سريعًا الأنوية الغنية بالنيوترونات عبر العملية السريعة (الخط الأدنى). وعندئذ تنحل تلك الأنوية وينبعث منها إلكترونات (انحلال بيتا)، وتنهمر إلى وادى الاستقرار. أما الأنوية الثقيلة جدًا، فتنقسم من خلال عملية انحلال ألفا أو عملية انشطار.

وهو نيتروچين ـ ١٤. وفى الوقت نفسه، تقلل سلسلة التفاعلات كمية النظير كربون ـ ١٣ المتصل بالكربون ـ ١٢. ووفقًا لنظريات الفيزياء الفلكية، يتعين أن تختلط كل نواتج هذه التفاعلات بسطح النجوم العملاقة الحمراء. وعندما تم تحليل الضوء المنبعث من النجوم العملاقة الحمراء بواسطة التحليل الطيفى، وجد العلماء خليطًا من نظائر الكربون والنيتروچين الذى تنبأت به النظرية.

وتثبت أيضًا سحب الغاز («الغيوم السديمية الكوكبية») الناتجة عن انفجارات نجمية صغيرة نسبيًا (مجرد نجوم مستقرة)(*) أن الخليط «الصحيح» من العناصر والنظائر يتفق مع نوع الطبخ النجمى للعناصر الذى سبق وصفه فى هذا الكتاب. ولكن كما أن السوبرنوفا يوفر أكبر مُدخل طاقة لتكوين العناصر الثقيلة، فإنه أيضًا يوفر أكبر انفجار عنيف لقذف مادة إلى الفضاء، وبذلك يمنح علماء الفلك أفضل الفرص لدراسة المادة النجمية. لقد تم تحديد هوية بقايا العديد من السوبرنوفا القديمة، وجرت دراستها بواسطة التحليل الطيفى، لكن كان هناك دائمًا عقبة خفية. إن سحابة الغاز التى يقذف بها انفجار السوبرنوفا إلى الفضاء تجرف الغاز والغبار من بين النجوم عند تحركها عبر الفضاء. وبالتالى عندما يدرس علماء الفلك سحابة المادة المتوهجة اليوم، بعد مئات أو آلاف السنوات من انفجار السوبرنوفا الذى أضاء ليل سماء أسلافنا، فإنهم لا يستطيعون فصل المعلومات التى يريدونها والخاصة بالعناصر المنتجة فى السوبرنوفا ذاته. لكن سوبرنوفا ١٩٨٧ كان مختلفًا، حيث تم التقاط شرائح فوتوغرافية له قبل وأثناء وبعد انفجاره.

وفقًا لنظرية الفيزياء الفلكية، يحدث قبل انفجار السوبرنوفا مباشرة أن تنتظم فى أغلفة حول القلب كل التفاعلات النووية القياسية التى تؤدى إلى تكوين عناصر مجموعة الحديد، وبالإضافة إلى ذلك فإن المنظرين على يقين بأن العملية البطيئة لأسر النيوترونات تقوم بعملها فى المنطقة الغنية بالكربون والأكسچين من النجم (شكل ١ ـ أ). إن احتراق السيليكون، كما سبق أن ذكرنا، يجعل النجم يتماسك لمدة أسبوع فقط فى مواجهة جذب قوة الجاذبية نحو الداخل (وهو ما حدث بالنسبة للسوبرنوفا ١٩٨٧، غير أنها مدة كافية، سمحت لأيان شيلتون أن يحصل على المسح الفوتوغرافى للسحابة الماجلانية الكبيرة)، ويتبقى بعد ذلك قلب يتكون من أكثر الأنوية استقرارًا – أنوية

(*) نجوم يتعاظم ضياؤها فجأة ثم يخبو فى بضعة شهور أو بضع سنوات.(المترجم).

الحديد والنيكل وباقى هذه المجموعة - التى لا تستطيع إطلاق طاقة «سواء» بالاندماج أو بالانشطار (ومع ذلك، فإن بعض أنوية مجموعة الحديد تلك يمكن أن تنحل إلى الحديد ذاته). وبعد أحد عشر مليون عام، يصبح قلب النجم بدون وسائل دعم، ومن ثم ينهار خلال بضعة أعشار من الثانية، ويتحول إلى كتلة لا يزيد قطرها على مائة كيلومتر. وأثناء هذا الانهيار الأول، تقوم فوتونات ذات طاقة عالية جدًا بشطر أنوية الحديد إلى نصفين، وتبطل بذلك عمليات الاندماج النووى التى استمرت أحد عشر مليون عام، وتنضغط الإلكترونات داخل الأنوية نتيجة ضغوط هائلة؛ حتى إن انحلال بيتا يعمل فى الاتجاه العكسى ويحول البروتونات إلى نيوترونات. وتوفر قوة الجاذبية الطاقة اللازمة لكل ذلك. ولا يتبقى بعد ذلك، سوى كرة من مادة النيوترون، عبارة عن «نواة ذرية» عملاقة، قُطرها مائتا كيلومتر وتحتوى حوالى مرة ونصف كتلة شمسنا.

كان انضغاط المادة الساقطة إلى الداخل كبيرًا جدًا؛ حتى إن مركز كرة النيوترون ينضغط لكثافات أكبر حتى من تلك التى فى نواة الذرة. عندئذ ترتد هذه المادة، مثل كرة جولف انضغطت فى قبضة حديدية ثم أُطلقت بعد ذلك، وترسل موجة صدمة عبر مادة كرة النيوترون، وإلى النجم من ورائها. وتندفع مادة من المناطق الخارجية لقلب النجم نحو الداخل بسرعة تعادل ربع سرعة الضوء تقريبًا. وتقابل صدمة الارتداد من مادة القلب النيوترونى، وتنقلب من الداخل إلى الخارج، لتصبح موجة صدمة تنطلق بأقصى سرعة «نحو الخارج» عبر النجم. وتفجر موجة الصدمة تلك النجم إلى أجزاء - لكن بعد أن يؤدى فيض النيوترونات المنبعث من كل هذا النشاط إلى إنتاج كمية كبيرة من العناصر الثقيلة عبر عملية الأسر السريعة للنيوترونات.

أما النيوترينات فإنها تتفادى الصدمة بسهولة، لأنها تنتقل بسرعة الضوء تقريبًا (وبسرعة الضوء بالضبط إذا كانت كتلة النيوترينو صفرًا)، فى حين تتحرك موجة الصدمة بسرعة تُقدر بحوالى ٢٪ من سرعة الضوء، حتى بعد حصولها على قوة دفع من النيوترينات، وتستغرق ساعتين لكى تدفع بالطبقات الخارجية للنجم فى الفضاء ويضىء النجم بشكل مرئى - ولذلك يتم التقاط النيوترينات بواسطة أجهزة الرصد الأرضية مباشرة قبل أن يسطع النجم.

وبينما يجرى كل ذلك، ورغم أن القلب الحديدى للنجم قد تحول إلى كرة من النيوترونات، يتعين، طبقًا للنظرية، أن يحدث فى المناطق الخارجية البعيدة عن قلب

النجم، فى موجة الصدمة الساخنة، ذات الضغط العالى، انفجار شديد من التفاعلات النووية، ينتج عناصر مجموعة الحديد. وأغلب العناصر التى نتجت داخل النجم من مثل تفاعلات الاندماج تلك قد تكونت بالفعل من عمليات إضافة متتالية لجسيمات ألفا (أنوية هليوم - ٤، تتكون كل نواة من بروتونين ونيوترونين متحدين معًا)، ولأنوية هذه العناصر عدد متساوٍ من البروتونات والنيوترونات. ومن الأمثلة النموذجية على ذلك نواة ذرة الكربون - ١٢ (٦ بروتونات و٦ نيوترونات)، ونواة ذرة الأكسچين - ١٦ (٨ بروتونات و٨ نيوترونات). وطبقًا للنظرية، عندما تتم معالجة هذه الأنوية بتفاعلات انفجارية يتحول أغلب المادة إلى نيكل - ٥٦، وتحتوى كل نواة منه على ٢٨ بروتونًا و٢٨ نيوترونًا. لكن النيكل - ٥٦ ليس مستقرًا، فهو يتحلل، وينبعث منه بوزيترونات نتيجة تحول البروتونات إلى نيوترونات (نقيض انحلال بيتا). ويبلغ العمر النصفى للخطوة الأولى من هذا الانحلال حوالى ستة أيام، وينتج عنها كوبالت - ٥٦، الذى يتحلل بدوره إلى حديد (٢٦ بروتونًا و٣٠ نيوترونًا) ويُقدر عمره النصفى بحوالى ٧٧ يومًا.

لقد تم بناء النيكل ـ ٥٦ غير المستقر بواسطة مَدَد من طاقة قوة الجاذبية الناجمة من انهيار قلب السوبرنوفا. ويتخلى هذا النيكل عن بعض الطاقة المقترضة عند انحلاله. إن النظرية القياسية الخاصة بالسوبرنوفا، والتى تم تطويرها قبل انفجار سوبرنوفا ١٩٨٧، قد تنبأت بأن كل الطاقة تقريبًا التى يشعها النجم خلال المائة يوم الأولى من حياته كسوبرنوفا، تأتى من انحلال الكوبالت - ٥٦ وتحوله إلى حديد ـ ٥٦. ويتم هذا الانحلال وفق نمط مميز، هو منحنى أس متناقص، ويتم أفول السوبرنوفا نفسها وفق المنحنى المفترض بالضبط. وخلال المائة يوم الأولى، أثبت هذا الدليل، أن ٩٣٪ من طاقة السوبرنوفا مستمدة فعلاً من انحلال الكوبالت ـ ٥٦، وبالفعل، لا يزال الأفول البطىء للسوبرنوفا يتبع المنحنى الخاص به وذلك حتى نهاية ١٩٨٩، عندما كنت أنتهى من هذا الكتاب، أى بعد مرور حوالى ثلاث سنوات على رصد شيلتون لسطوع السوبرنوفا لأول مرة. ويقول روجر تيلور عالم الفيزياء الفلكية بجامعة سوسكى إن هذه المشاهدات عن انحلال الكوبالت «قد تكون أهم المشاهدات المتعلقة بأصل العناصر وأكثرها إثارة، حيث تؤكد أن النموذج النظرى صحيح بشكل كبير».

إن تايلور لم يكن يشير فقط إلى «منحنى الضوء»، كما يُسمى. فعندما تتحرك فى الفضاء المادة المقذوفة من السوبرنوفا إلى الخارج، تتكشف طبقات متتالية من المكونات

الداخلية للسوبرنوفا لتلسكوبات المراقبين الذين يتابعون بصبر، نوعًا من الإستربتيز الكونى. لقد تمكنوا، أخيرًا، من مشاهدة خروج مادة من المناطق التى من المفترض أن تحدث فيها التفاعلات النووية - وكانت دراساتهم الخاصة بالتحليل الطيفى قد كشفت الخطوط المميزة المرتبطة بعنصر النيكل ـ ٥٦، تمامًا كما كان متوقعًا، وأشارت إلى أن كمية النيكل - ٥٦ التى صُنعت فى السوبرنوفا تكافئ ٨٪ من كتلة شمسنا (مع الأخذ فى الاعتبار التحلل الذى حدث قبل وقت رصد ومشاهدة هذا الجزء من النجم) ـ وهو ما يتفق بشكل كبير مع الحسابات النظرية. كما كشفت دراسات التحليل الطيفى عن وجود باريوم، وسترنشيوم وسكانديوم - وكلها عناصر نتجت عن عملية الأسر البطيئة للنيوترونات قبل أن يصبح النجم سوبرنوفا. وإن دراسة الهليوم والنيتروچين فى أقصى الطبقات الخارجية من سحابة المادة المتمددة حول السوبرنوفا، قد ساعدت علماء الفيزياء الفلكية فى تحسين فهمهم لكيفية اختلاط المادة الناتجة من دورة الكربون - النيتروچين (C-.N) مع سطح النجم.

بالطبع كانت هناك مفاجآت أيضًا، فلم تكن تفاصيل سلوك السوبرنوفا ١٩٨٧ تتفق بدقة فى كل حالة مع تفاصيل النظريات، وبالتالى، فإن المجال واسع أمام علماء الفلك لصقل فهمهم لكيفية انفجار مثل تلك النجوم. لكن ذكر التنبؤات الجديدة الخاصة بالطريقة التى يتكون بها الكربون والعناصر المرتبطة به وطريقة اختلاطها بالكون يقدم إشارة إلى ضرورة إنهاء مناقشتى الحالية. إن تلك العناصر - الكربون والأكسچين والنيتروچين ـ هى فى النهاية، العناصر التى نتكون منها بشكل كبير، كما تشكل أهمية قصوى بالنسبة للحياة كما نعرفها. وتحمل مشاهدات صورة الطيف لهذه العناصر فى سحابة المادة الممتدة حول سوبرنوفا ١٩٨٧ رسالة تذكير بأنه فى الوقت الذى سجل هذا الانفجار وفاة نجم فإنه سجل، وبشكل حرفى، بداية قصة أشكال من الحياة مثل حياتنا. وإذا لم تكن هناك تلك الأجيال السابقة من انفجارات السوبرنوفا التى نثرت نصيبها من الكربون، والنيتروچين، والأكسچين، وعناصر أخرى عبر الفضاء الواقع بين النجوم منذ مليارات السنين، ربما ما كنا هنا، نتساءل عن ألغاز مثل مشكلة النيوترينو، وكيف تبقى الشمس ساخنة طوال ذلك الوقت، ولماذا ترن مثل الجرس. وبقدر ما يتعلق الأمر بأشكال حياة مثل حياتنا، فإن قصتى تنتهى، فى الواقع، فى البداية.

ثَبْت المراجع

إذا كنت تريد معرفة المزيد عن أسرار الشمس، فإن الكتب التالية ستزودك بمعلومات أكثر تفصيلاً عن بعض الموضوعات التى قمت بمناقشتها:

١ - Peter Atkins, the second law, scientific American/W. H. Freeman, New york, 1984.

تقرير عن أهمية الديناميكا الحرارية لفهمنا للعالم، لا يحتوى على رياضيات وسهل الفهم.

٢ - Peter Brent, Charles Darwin, Heinemann, London, 1981. ، سيرة «مبسطة» توضح ما يدين به دارون لـ «ليل» (Lyell).

٣ - Joe Burchfield, Lord Kelvin and the Age of the earth, Macmillan, London and New york, 1945.

القصة النهائية لإسهام كلفن فى الجدل حول عمر كل من الأرض «و» الشمس. هذا الكتاب مفيد بالنسبة للمتخصصين، أو أى شخص تستهويه قصة كيف تطور العلم فى القرن التاسع عشر.

٤ - Subrahmanyan Chandrasekhar, Eddington, Campridge University Press, 1983.

دراسة صغيرة، تستند على المحاضرات التى ألقاها المؤلف فى كمبريدج احتفالاً بمرور مائة عام على ميلاد إدينجتون. وأفضل ما وصفه به «إنه أكثر علماء عصره تميزًا فى مجال الفيزياء الفلكية».

٥ - Frank Close, the Cosmic Onion, Heinemann Educational Books, London, 1983.

لا تجعل كلمة «تربوى» فى اسم الناشر تصدك عن الكتاب، فهو دليل سهل التناول وسريع لعالم الجسيمات، وهو من أفضل الكتب فى هذا المجال، وسيضع النيوترينو بشكل خاص فى مكانه بالنسبة لك.

٦ - frank Close, Michael Martin, Christine Sutton, The Particle Explosion, Oxford University Press, 1984.

تاريخ مصور لكل الجسيمات المعروفة ابتداء من الإلكترون إلى الـ W والـ Z، معروض بشكل رائع. لقد تضافرت مواهب كلوز، عالم فيزياء الجسيمات، ومارتن، الباحث فى مجال الصور العلمية، والكاتبة العلمية سوتون، لإنتاج كتاب يجمع بين الفائدة العلمية والجمال. لكن للأسف، لم يتناولوا الجسيمات التى لم يتم رصدها، مثل الأكسيون والويمپ. ويقدم الكتاب معلومات جيدة جدًا عن النيوترينات، وإن كانوا لم يعطوا راى داڤيز ما يستحقه من تقدير.

٧ - Charles Darwin, The Origin Of Species By Means Of Natural Selection, Pelican, London, 1968.

نسخة سهلة التناول من البحث الكبير، وهى طبعة معادة تتضمن أيضًا بعض المادة الأخيرة، لكنها أساسًا الطبعة الأولى التى صدرت عام ١٨٥٩. لقد أوضح دارون من البداية أن الوقت المطلوب للتطور لكى يقوم بعمله أكثر بكثير من بضعة آلاف من السنوات، كما قدر أيضًا الوقت الذى يتعين أن تكون قد استغرقته القوى الطبيعية لتشكل صفحة الأرض.

٨ - Arthur Eddington, The Internal Constitution Of The Stars, Dover, New York, 1959.

هذه هى النسخة المتاحة حاليًا، النسخة الأصلية صدرت عام ١٩٢٦ وقامت بنشرها Cambridge University Press، وفى النهاية فإن نص Dover مثل النسخة الأصلية. وهو مرجع للفيزياء الفلكية، ليس بالشىء الذى تتصفحه للقراءة

الخفيفة، لكن إذا كان نديك الخلفية العلمية اللازمة لذلك فإنه يستحق تماماً البحث عنه والجد فى طلبه.

٩ - kendrick Frazier, Our Turbulent Sun, Prentice - Hall, New Jersey, 1982.

رؤية صحفية لألغاز مثل ندرة النيوترينات الشمسية، ودورة بقع الشمس، والارتباط بين نشاط الشمس والمناخ على كوكب الأرض. كتاب لطيف للقراءة الخفيفة فى الموضوع، وإن كانت مفيدة.

١٠ - Herbert Friedman, Sun And Earth, Scientific American/ W.h. Freemahn, New York, 1986.

دليل مصور، يناسب الشخص العادى، ويرسخ المعرفة الجارية عن الشمس وتأثيرها على الأرض، مع تأكيد، أكبر مما أقدم هنا، على جانب الرصد التقليدى لعلم الفلك.

١١ - George Gamow, A Star Called The Sun, Viking Press, New York, 1964.

هذا الكتاب نفد، ولكنه يستحق أن تحاول البحث عنه فى محلات بيع الكتب القديمة أو المكتبات العامة. وهو سهل القراءة، مثل كل كتب جامو التى تعمل على تبسيط العلوم، وهو زاخر بالأمثلة الضاحكة وإن كانت دقيقة علمياً. هذا الكتاب بالذات مثير للاهتمام بشكل خاص لأنه يتضمن أبحاث جامو الخاصة بانحلال ألفا التى أدت إلى فهم كيف يمكن أن يحدث الاندماج النووى داخل الشمس عند درجة حرارة لا تتجاوز ١٥ مليون درجة «فقط». ويستحق هذا الكتاب أن يُقرأ وإن كان قد تجاوزه الزمن بعض الشيء.

١٢ - John Gribbin, In Search Of Shrödinger's Cat, Corgi, Lonon, And Bantom, New York, 1984.

قصة ثورة الكَمّ التى تلت الفيزياء فى الثلث الأول من القرن العشرين.

١٣ - John Gribbin, In Search Of The Big Bang, Heinemann, London, And Bantam, New York, 1986.

المزيد عن العلاقة بين فيزياء الجسيمات والكوزمولوچيا.

١٤ - John Gribin, The Omega Point, Hinemamm, London, 1987.

كتاب عن المصير النهائى للكون، ويتضمن مناقشة للديناميكا الحرارية ولطبيعة الزمن.

١٥ - John Gribbin And Martin Rees, Cosmic Coincidences, Bantam, New York, 1989 (صدر فى بريطانيا عن heinemann بعنوان: Stuff Of The Universe) المزيد عن أنواع مختلفة من المرشحين للمادة المعتمة فى الكون.

١٦ - Fred Hoyle, The Nature Of The Universe, Blackwell, Oxford, 1950.

كتاب موجز، يستند على مجموعة أحاديث إذاعية للمؤلف فى إذاعة الـ بى. بى. سى، وهو يتضمن فصلاً عن الشمس، كما يقدم، بين أشياء أخرى، الإسهام الرئيس الذى أدى إلى كشف سر كيف تتكون العناصر داخل النجوم، لذلك فهو كتاب مثير للاهتمام تاريخيًا وزاخر بالأمثلة القوية. غير أنه نفد من الأسواق من فترة طويلة، ولا داعى لبذل جهد كبير للحصول عليه إذا لم تتمكن من العثور عليه بسهولة.

١٧ - Mick Kelly And John Gribbin, Winds Of Change, Headway, London, 1989.

المزيد عن تأثير الصوبة، الذى أشرت إليه هنا باختصار فى الفصل السادس، والذى قد يكون أكثر مشكلة ضاغطة تواجه الجنس البشرى فى القرن الواحد والعشرين.

١٨ - Clive Kilmister, Sir Eddington, Pergamon, Oxford And New York 1966.

كتاب عن إدينجتون وأبحاثه ومكانته فى العلم، وهو يتضمن استشهادات كثيرة ومطولة من أهم ما نشره، بما فى ذلك كتابه: The Internal Constitution Of The Stars. وكتاب Clive موجه بالذات للطلاب الذين يدرسون تاريخ العلم.

١٩ - Rudolf Kippenhahn, 100 Billion Suns, Weidenfeld And Nicol-son, London, 1983.

تقرير مبسط وسهل القراءة عن الكيفية التى تعمل بها النجوم يقدمه رائد ألمانى فى مجال الفيزياء الفلكية.

٢٠ - Hubert Lamb, Climate, History and the Modern World, Methuen, London and New York, 1982.

أفضل دليل للتغيرات المناخية عبر الأزمنة التاريخية، وتأثير تلك التغيرات على أعمال البشر. ويضم إشارة مختصرة عن بقع الشمس، وجزءًا كبيرًا عن العصر الجليدى الصغير.

٢١ - Kenneth Lang And Owen Gingerich, A Source Book In Astronomy And Astorphysics, 1900-1975, Harvard University Press, 1979.

كنز رائع من الأبحاث العلمية التاريخية النفسانية، غير أنه ضخم وباهظ الثمن بحيث يصعب أن تشتريه لنفسك، لكنه يستحق أن تبحث عنه فى المكتبات العامة.

٢٢ - Robert Noyes, The Sun, Our Star, Harvard University Press, 1982.

أفضل وصف غير متخصص للشمس وطريقة عملها فى الوقت الذى كُتب فيه، لكن الأحداث قد تجاوزته الآن. والمؤلف أستاذ علم الفلك فى جامعة هارفارد، ولقد أشار بشكل مختصر إلى مشكلة النيوترين والذبذبات الشمسية، ولم يذكر شيئًا، بالطبع، عن الويمپات لكنه متمكن فى موضوعات مثل بقع الشمس وتغير وجه الشمس وإنتاج الطاقة فى النجوم.

٢٣ - Abraham Pais, Inward Bound, Oxford, University Press, 1986.

كتاب مدهش، وعمل عبقرى يدل على البراعة، فهو يغطى تاريخ فيزياء الجسيمات منذ اكتشاف الأشعة السينية فى عام ١٨٩٥، إلى الانشطار النووى فى أواخر الثلاثينيات بكفاءة بالغة وبوضوح لا يقل عن ذلك. يأتى هذا الجزء من الكتاب فى ٤٤٤ صفحة، ثم يستعرض فى ١٨٢ صفحة سنوات ما بعد الحرب بشكل سريع، لينتهى باكتشاف جسيمات W و Z، التى يعتبرها الكثيرون أنها تشير إلى أن علماء الفيزياء على الطريق الصحيح نحو «النظرية الموحدة الكبرى» لكل الجسيمات وكل القوى الموجودة فى الطبيعة.

وبالرغم من أن هذا الكتاب زاخر بالعلم الدقيق، فإنه يروى أساسًا قصة الفيزياء والأشخاص الذين شاركوا فى سنوات الاكتشاف العظيمة تلك. قد يكون سعره وليس صعوبة محتواه على الفهم السبب فى صدك عن شرائه، غير أن هذا الكتاب يستحق أن تنقب عنه فى أية مكتبة عامة، أو تقنع المكتبة أن تضعه على أرففها. وإذا كنت محرجًا من سعر الكتاب أو حجمه فلتحاول الحصول على كتب Frank Close التى أشرت إليها آنفًا.

صدر فى هذا المشروع(*)

• **أولاً: الموسوعات والمعاجم**

ليونارد كوتريل، **الموسوعة الأثرية العالمية**
ويليام بيتر، **معجم التكنولوجيا الحيوية**
ج. كارفيل، **تبسيط المفاهيم الهندسية**
ب. كوملان، **الأساطير الإغريقية والرومانية**
و.د. هاملتون وآخرون، **المعجم الجيولوجى المصور فى المعادن والصخور والحفريات**
حسام الدين زكريا، **المعجم الشامل للموسيقى العالمية (ج١،ج٢)**
خيرية البشلاوى، **معجم المصطلحات السينمائية**
دونالد نيكول، **معجم التراجم البيزنطية**

• **ثانيًا: الدراسات الاستراتيجية وقضايا العصر**

د.محمد نعمان جلال، **حركة عدم الانحياز فى عالم متغير**
إريك موريس،آلان هو، **الإرهاب**
ممدوح عطية، **البرنامج النووى الإسرائيلى**
د. لينوار تشامبرز رايت، **سياسة الولايات المتحدة الأمريكية إزاء مصر**
إزرا .ف. فوجل، **المعجزة اليابانية**
د.السيد نصر السيد، **إطلالات على الزمن الآتى**
بول هاريسون، **العالم الثالث غدًا**
أقطاب العلماء الأمريكيين، **مبادرة الدفاع الاستراتيجى: حرب الفضاء**
و. مونتجمرى وات، **الإسلام والمسيحية فى العالم المعاصر**
بادى أونيمود، **أفريقيا الطريق الآخر**
فانس بكارد، **إنهم يصنعون البشر (٢ج)**
مارتن فان كريفلد، **حرب المستقبل**
ألفين توفلر، **تحول السلطة (٢ج)**
ممدوح حامد عطية، **إنهم يقتلون البيئة**
د.السيد أمين شلبى، **جورج كينان**
يوسف شرارة، **مشكلات القرن الحادى والعشرين والعلاقات الدولية**
د. السيد عليوة، **إدارة الصراعات الدولية**
د. السيد عليوة، **صنع القرار السياسى**
جرج كاشمان، **لماذا تنشب الحروب(٢ج)**
إيمانويل هيمان، **الأصولية اليهودية**
آلان أنترمان، **اليهود (عقائدهم الدينية وعباداتهم)**
د. ممدوح عطية وأخرون، **البرنامج النووى الإيرانى والمتغيرات فى أمن الخليج**
أنجيلو كودفيللا، **المخابرات وفن الحكم**
بريدراج ماتفيجيفتش، **تراتيل متوسطية**

• **ثالثًا: العلوم والتكنولوجيا**

ميكائيل ألبى، **الانقراض الكبير**
فيرنر هيزنبرج، **الجزء والكل: محاورات فى مضمار الفيزياء الذرية**
فريد هويل، **البذور الكونية**
ويليام بينز، **الهندسة الوراثية للجميع**
د. جوهان دورشنر، **الحياة فى الكون كيف نشأت وأين توجد**
إسحق عظيموف، **الشموس المتفجرة (أسرار السوبرنوفا)**

(*) قائمة مصنفة وموجزة بالكتب التى صدرت فى مشروع الألف كتاب الثانى، ولمزيد من البيانات يمكن الرجوع إلى قائمة المشروع بموقع الهيئة المصرية العامة للكتاب **WWW.egyptianbook.org.eg**

روبرت لافور، البرمجة بلغة السى باستخدام تيربوسى (٢ج)
إدوارد إيه فايجينباوم،الجيل الخامس للحاسوب
د.محمود سرى طه، الكمبيوتر فى مجالات الحياة
د. مصطفى عنانى، الميكروكمبيوتر
ى.رادو نسكاياى،الإلكترونيات والحياة الحديثة
جلال عبد الفتاح، الكون ذلك المجهول
إيفرى شاتزمان، كوننا المتمدد
فرد س. هيس، تبسيط الكيمياء
كاتى ثير، تربية الدواجن
د. محمد زينهم، تكنولوجيا فن الزجاج
لارى جونيك ومارك هوبليس، الوراثة والهندسة الوراثية بالكاريكاتير
جينا كولاتا، الطريق إلى دوللى
دور كاس ماكلينتوك، صور أفريقية: نظرة على حيوانات أفريقيا
إسحق عظيموف، أفكار العلم العظيمة
د. مصطفى محمود سليمان، الزلازل
بول دافيز، الدقائق الثلاث الأخيرة
ويليام هـ .. ماثيوز، ما هى الجيولوجيا؟
إسحق عظيموف، العلم وآفاق المستقبل
ب.س. ديفيز، المفهوم الحديث للمكان والزمان
د. محمود سرى طه، الاتجاهات المعاصرة فى عالم الطاقة
بانش هوفمان، آينشتين
زافيلسكى ف.س.، الزمن وقياسة
ر.ج.فوربس، تاريخ العلم والتكنولوجيا (٢ج)
د. فاضل أحمد الطائى، أعلام العرب فى الكيمياء
رولاند جاكسون، الكيمياء فى خدمة الإنسان
إبراهيم القرضاوى، أجهزة تكييف الهواء
ديفيد ألدرتون، تربية أسماك الزينة
أندريه سكوت، جوهر الطبيعة
إيجور إكيموشكين، الإيثولوجى
بارى باركر، السفر فى الزمان الكونى
ديمترى ترايفونوف، ظلال الكيمياء
بول ديفز، جونز جريبين، أسطورة المادة
جيفرى ماوسابيف ماسون، حين تبكى الأفيال
ليونارد كول، السلاح الحادى عشر
و. جراهام ريتشاردز، أسرار الكيمياء
د. زين العابدين متولى، وبالنجم هم يهتدون
د.كامل زكى حميد،الاستنساخ قنبلة بيولوجية
فلاديمير سميلجا، النسبية والإنسان
د. محمد فتحى عوض الله، رحلات جيولوجية فى صحراء مصر الشرقية
ليونيد بونوماريف، الاحتمالات المثيرة للنظرية الكمية

• رابعًا: الاقتصاد

ديفيد وليام ماكدويل، مجموعات النقود (صيانتها، تصنيفها، عرضها)
د. نورمان كلارك، الاقتصاد السياسى للعلم والتكنولوجيا
سامى عبد المعطى، التخطيط السياحى فى مصر
جابر الجزار، ماستريخت والاقتصاد المصرى
ولت ويتمان روستو، حوار حول التنمية الاقتصادية
فيكتور مورجان، تاريخ النقود
ليستر ثورو، مستقبل الرأسمالية
د. ناصر جلال، حقوق الملكية الفكرية

• خامسًا: مصر عبر العصور

محرم كمال، الحكم والأمثال والنصائح عند المصريين القدماء
فرانسوا ديماس، آلهة مصر
سيريل ألدريد، إخناتون
موريس بيراير، صناع الخلود

بكنت أ. كتشن، **رمسيس الثانى: فرعون المجد والانتصار**
ألن شورتر، **الحياة اليومية فى مصر القديمة**
ونفرد هولمز، **كانت ملكة على مصر**
جاك كرابس جونيور، **كتابة التاريخ فى مصر**
نفتالى لويس، **مصر الرومانية**
عبده مباشر، **البحرية المصرية من محمد على للسادات (١٨٠٥ –١٩٧٣)**
د. السيد طه أبو سديرة، **الحرف والصناعات فى مصر الإسلامية**
جابريل باير، **تاريخ ملكية الأراضى فى مصر الحديثة**
عاصم محمد رزق، **مراكز الصناعة فى مصر الإسلامية**
ت.ج.هـــ.جيمز، **كنوز الفراعنة**
حسن كمال، **الطب المصرى القديم**
أ.أ.س. إدواردز، **أهرام مصر**
سومرز كلارك، **الآثار القبطية فى وادى النيل**
كريستيان ديروش نوبلكور، **المرأة الفرعونية**
بيل شول وأدبنيت، **القوة النفسية للأهرام**
جيمس هنرى برستيد، **تاريخ مصر**
د. بيارد دودج، **الأزهر فى ألف عام**
أ. سبنسر، **الموتى وعالمهم فى مصر القديمة**
الفريد ج. بتلر، **الكنائس القبطية القديمة فى مصر (ج٢)**
روز أليندم، **الطفل المصرى القديم**
ج٠ و٠ مكفرسون، **الموالد فى مصر**
جون لويس بوركهارت، **العادات والتقاليد المصرية من الأمثال الشعبية**
سوزان راتييه، **حتشبسوت**
مرجريت مرى، **مصر ومجدها الغابر**
أولج فولكف، **القاهرة مدينة ألف ليلة وليلة**
د. محمد أنور شكرى، **الفن المصرى القديم**
ت.ج. جيمز، **الحياة أيام الفراعنة**
ايفان كونج، **السحر والسحرة عند الفراعنة**
تشارلز نيمس، **طيبة (آثار الأقصر)**
رندل كلارك، **الرمز والأسطورة فى مصر القديمة**
ديمترى ميكس، **الحياة اليومية للآلهة الفرعونية**
محمد عبد الحميد بسيونى، **بانوراما فرعونية**
حمدى عثمان، **هؤلاء حكموا مصر**
ميكل ونتر، **المجتمع المصرى تحت الحكم العثمانى**
بربارة واترسون، **أقباط مصر**
إيريك هورنونج، **فكرة فى صورة**
بيير جرانديه، **رمسيس الثالث**
محسن لطفى السيد، **أساطير معبد أدفو**
د. نبيل عبيد، **الطب المصرى فى عصر الفراعنة**

- **سادسًا: الكلاسيكيات**

جاليليو جاليليه، **حوار حول النظامين الرئيسين للكون (٣ج)**
أبو القاسم الفردوسى، **الشاهنامة (٢ج)**
إدوارد جيبون، **اضمحلال الإمبراطورية الرومانية وسقوطها (٣ج)**
ناصر خسرو علوى، **سفر نامة**
فيليب عطية، **ترانيم زرادشت**
جورج جاموف، **بداية بلا نهاية**
د.رمسيس عوض، **أبرز ضحايا محاكم التفتيش**

- **سابعًا: الفن التشكيلى والموسيقى**

عزيز الشوان، **الموسيقى تعبير نغمى ومنطق**
ألويز جرايتر، **موتسارت**
شوكت الربيعى، **الفن التشكيلى المعاصر فى الوطن العربى**
ليوناردو دافنشى، **نظرية التصوير**

د. غبريال وهبه، **أثر الكوميديا الإلهية لدانتي في الفن التشكيلي**
روبين جورج كولنجوود، **مبادئ الفن**
مارتن جك، **يوهان سباستيان باخ**
ميخائيل شتيجمان، **فيفالدي**
هيربرت ريد، **التربية عن طريق الفن**
أدامز فيليب، **دليل تنظيم المتاحف**
حسام الدين زكريا، **أنطون بروكنر**
جيمس جينز، **العلم والموسيقى**
هوجو لا يختنتريت، **الموسيقى والحضارة**
محمد كمال إسماعيل، **التحليل والتوزيع الأوركسترالي**
د. صالح رضا، **ملامح وقضايا في الفن التشكيلي المعاصر**
إدموندو سولمي، **ليوناردو**
سيونايد ميرى روبرتسون، **الأشغال الفنية والثقافة المعاصرة**

• ثامنًا: الحضارات العالمية

جاكوب برونوفسكى، **التطور الحضاري للإنسان**
س.م. بورا، **التجربة اليونانية**
جوستاف جرونيباوم، **حضارة الإسلام**
أ.د. جرني، **الحيثيون**
ل. ديلابورت، **بلاد ما بين النهرين**
ج. كونتنو، **الحضارة الفينيقية**
جوزيف نيدهام، **تاريخ العلم والحضارة في الصين**
ستيفن رانسيمان، **الحضارة البيزنطية**
سبتينو موسكاتى، **الحضارات السامية**

• تاسعًا: التاريخ

جوزيف داهموس، **سبع معارك فاصلة في العصور الوسطى**
هنرى بيرين، **تاريخ أوروبا في العصور الوسطى**
أرنولد توينبى، **الفكر التاريخي عند الإغريق**
بول كولز، **العثمانيون في أوروبا**
جوناثان ريلى سميث، **الحملة الصليبية الأولى وفكرة الحروب الصليبية**
د. بركات أحمد، **محمد واليهود**
ستيفن أوزمنت، **التاريخ من شتى جوانبه(٣ج)**
و. بارتولد، **تاريخ الترك في آسيا الوسطى**
فلاديمير تيسمانيانو، **تاريخ أوروبا الشرقية**
د.ألبرت حورانى، **تاريخ الشعوب العربية(٢ج)**
نويل مالكوم، **البوسنة**
جارى.ب. ناش، **الحمر والبيض والسود**
أحمد فريد رفاعى، **عصر المامون (٢ج)**
آرثر كيستلر، **القبيلة الثالثة عشرة ويهود اليوم**
ناجاى متشيو، **الثورة الإصلاحية في اليابان**
محمد فؤاد كوبريلى، **قيام الدولة العثمانية**
د. أبرار كريم الله، **من هم التتار؟**
ستيفن رانسيمان، **الحملات الصليبية**
آلبان ويدجرى، **التاريخ وكيف يفسرونه (٢ج)**
جوسيبى دى لونا، **موسولينى**
جوردون تشيلد، **تقدم الإنسانية**
هـ.ج. ولز، **معالم تاريخ الإنسانية (٤ج)**
هـ. سانت موس، **ميلاد العصور الوسطى**
يوهان هويزنجا، **اضمحلال العصور الوسطى**
هـ.ج. ويلز، **موجز تاريخ العالم**
لورد كرومر، **الثورة العرابية**
و. مونتجمرى وات، **محمد في مكة**
ألبرت براجو، **ثورات أمريكا الإسبانية**

• عاشرًا: الجغرافيا والرحلات

ت.و. فريمان، **الجغرافيا في مائة عام**
ليستردیل رای، **الأرض الغامضة**
رحلة جوزيف بتس (الحاج يوسف)
إميليا إدواردز، **رحلة الألف ميل**
رحلات فارتيما (الحاج يونس المصرى)

رحلة بيرتون إلى مصر والحجاز (٣ج)
رحلة عبد اللطيف البغدادى فى مصر
رحلة الأمير رودلف إلى الشرق (٣ج)
يوميات رحلة فاسكو داجاما
س. هوارد، أشهر الرحلات إلى غرب أفريقيا
إريك أكسيلون، أشهر الرحلات فى جنوب أفريقيا
وليم مارسدن، رحلات ماركو بولو (٣ج)
د. مصطفى محمود سليمان، رحلة فى أرض سبأ

• حادى عشر: الفلسفة وعلم النفس

جون بورر، الفلسفة وقضايا العصر (٣ج)
سوندراى، الفلسفة الجوهرية
جون لويس، الإنسان ذلك الكائن الفريد
سدنى هوك، التراث الغامض: ماركس والماركسيون
إدوارد دو بونو، التفكير المتجدد
رونالد دافيد لانج، الحكمة والجنون والحماقة
د. توماس أ. هاريس، التوافق النفسى: تحليل المعاملات الإنسانية
د. أنور عبد الملك، الشارع المصرى والفكر
نيكولاس ماير، شارلوك هولمز يقابل فرويد
أنطونى دى كرسبنى، أعلام الفلسفة المعاصرة
جين وروبرت هاندلى،كيف تتخلصين من القلق؟
هـ ج. كريل، الفكر الصينى
د. السيد نصر السيد، الحقيقة الرمادية
برتراند راصل، السلطة والفرد
مارجريت روز، ما بعد الحداثة
كارل بوبر، بحثا عن عالم أفضل
ريتشارد شاخت، رواد الفلسفة الحديثة
جوزيف داهموس، سبعة مؤرخين فى العصور الوسطى

د. روجر ستروجان، هل نستطيع تعليم الأخلاق للأطفال؟
إريك برن، الطب النفسي والتحليل النفسى
بيرتون بورتر، الحياة الكريمة (٢ج)
فرانكلين ل . باومر، الفكر الأوربى الحديث (٤ج)
هنرى برجسون، الضحك
أرنست كاسيرر، فى المعرفة التاريخية
و. مونتجمرى وات، القضاء والقدر
إدوارد دو بونو، التفكير العملى

• ثانى عشر: العلوم الاجتماعية

د. محيى الدين أحمد حسين، التنشئة الأسرية والأبناء الصغار
م. و ثرنج، ضمير المهندس
رايموند وليامز، الثقافة والمجتمع
روى روبرتسون، الهيروين والإيدز
بيتر لورى، المخدرات حقائق نفسية
د. ليو بوسكاليا، الحب
برنسلاو مالينوفسكى، السحر والعلم والدين
بيتر ر. داى، الخدمة الاجتماعية والانضباط الاجتماعى
بيل جيرهارت، تعليم المعوقين
أرنولد جزل، الطفل من الخامسة إلى العاشرة
رونالد د. سمبسون، العلم والطلاب والمدارس
كارل ساجان، عالم تسكنه الشياطين

• ثالث عشر: المسرح

لويس فارجاس، المرشد إلى فن المسرح
برونو ياشينسكى، حفلة مانيكان
جلال العشرى، فكرة المسرح
جان بول سارتر، جورج برناردشو، جان أنوى مختارات من المسرح العالمى
د. عبد المعطى شعراوى، المسرح المصرى المعاصر: أصله وبداياته

توماس ليبهارت، **فن المايم والبانتومايم**
زيجمونت هيبنر، **جماليات فن الإخراج**
أوجين يونسكو، **الأعمال الكاملة (٢ج)**
آلان ماكدونالد، **مسرح الشارع**
نك كاى، **ما بعد الحداثية والفنون الأدائية**
بيتر بروك، **التفسير والتفكيك والإيديولوجية**
أندرية فيلبيه، **الممثل الكوميدى**
لى ستراسبرج، **تدريب الممثل**
جلال جميل محمد، **مفهوم الضوء والظلام فى العرض المسرحى**
أيوجينيو باربا، **زورق من الورق**

- **رابع عشر: الطب والصحة**

بوريس فيدوروفيتش سيرجيف، **وظائف الأعضاء من الألف إلى الياء**
د. جون شندلر، **كيف تعيش ٣٦٥ يوما فى السنة**
د. ناعوم بيتروفيتش، **النحل والطب**
م.هـ. كنج، **التغذية فى البلدان النامية**

- **خامس عشر: الآداب واللغة**

برتراند رسل، **أحلام الأعلام وقصص أخرى**
ألدس هكسلى، **نقطة مقابل نقطة**
جول ويست، **الرواية الحديثة : الإنجليزية والفرنسية**
أنور المعداوى، **على محمود طه: الشاعر والإنسان**
جوزيف كونراد، **مختارات من الأدب القصصى**
تاجور شين ين بنج وآخرون، **مختارات من الآداب الآسيوية**
محمود قاسم، **الأدب العربى المكتوب بالفرنسية**
سوريال عبد الملك، **حديث النهر**
د. رمسيس عوض، **الأدب الروسى قبل الثورة البلشفية وبعدها**
مختارات من الأدب اليابانى: الشعر، الدراما، الحكاية، القصة القصيرة
ديفيد بشبندر، **نظرية الأدب المعاصر**
نادين جورديمر وآخرون، **سقوط المطر وقصص أخرى**
رالف ئى ماتلو، **تولستوى**
والتر ألن، **الرواية الإنجليزية**
هادى نعمان الهيتى، **أدب الأطفال**
مالكوم برادبرى، **الرواية اليوم**
لوريتو تود، **مدخل إلى علم اللغة**
د. جابرييل جارسيا ماركيز، **سيمون بوليفار أو (الجنرال فى المتاهة)**
ديلاسى أوليرى، **الفكر العربى ومكانه فى التاريخ**
د. على عبد الرءوف البمبى، **مختارات من الشعرالإسبانى فى العصور الوسطى (ج١)**
ب. إفور إيفانز، **موجز تاريخ الدراما الإنجليزية**
ج. س. فريزر، **الكاتب الحديث وعالمه (٢ج)**
جورج ستاينر، **بين تولستوى ودستويفسكى (٢ج)**
ديلان توماس، **مجموعة مقالات نقدية**
فيكتور برومبير، **ستندال (مقالات نقدية)**
فيكتور هوجو، **رسائل وأحاديث من المنفى**
يانكو لافرين، **الرومانتيكية والواقعية**
د. نعمة رحيم الغزاوى، **أحمد حسن الزيات كاتبًا وناقداً**
ف. برميلوف، **دستويفسكى**
لجنة الترجمة بالمجلس الأعلى للثقافة، **الدليل الببليوجرافى: روائع الآداب العالمية (ج١)**
محسن جاسم الموسوى، **عصر الرواية: مقال فى النوع الأدبى**
هنرى باربوس، **الجحيم**

ميجيل دى ليبس، **الفئران**
روبرت سكولز وآخرون، **آفاق أدب الخيال العلمى**
يانيس ريتسوس، **البعيد (مختارات شعرية)**
ب. إيفور ايفانس، **مجمل تاريخ الأدب الإنجليزى**
فخرى أبو السعود، **فى الأدب المقارن**
سليمان مظهر، **أساطير من الشرق**
ف.ع. أدينكوف، **فن الأدب الروائى عند تولستوى**
د. صفاء خلوصى، **فن الترجمة**
بلدوميرو ليلو وآخرون، **قصص من أمريكا اللاتينية**
بورخيس، **مختارات الفانتازيا والميتافيزيقا**
مايكل كانينجهام، **الساعات**

• سادس عشر: الإعلام

فرانسيس ج. برجين، **الإعلام التطبيقى**
بيير ألبير، **الصحافة**
هربرت ثيلر، **الاتصال والهيمنة الثقافية**

• سابع عشر: السينما

هاشم النحاس، **الهوية القومية فى السينما العربية**
ج. دادلى أندرو، **نظريات الفيلم الكبرى**
روى آرمز، **لغة الصورة فى السينما المعاصرة**
إدوارد مرى، **عن النقد السينمائى الأمريكى**
جوزيف م. بوجز، **فن الفرجة على الأفلام**
سعيد شيمى، **التصوير السينمائى تحت الماء**
دوايت سوين، **كتابة السيناريو للسينما**
هاشم النحاس، **نجيب محفوظ على الشاشة**
يوجين فال، **فن كتابة السيناريو**
دانييل أريخون، **قواعد اللغة السينمائية**
كريستيان ساليه، **السيناريو فى السينما الفرنسية**
تونى بار، **التمثيل للسينما والتليفزيون**
آلان كاسبيار، **التذوق السينمائى**
بيتر نيكولز، **السينما الخيالية**
بول وارن، **خفايا نظام النجم الأمريكى**
دافيد كوك، **تاريخ السينما الروائية**
هاشم النحاس، **صلاح أبو سيف (محاورات)**
جان لويس بورى وآخرون، **فى النقد السينمائى الفرنسى**
محمود سامى عطاالله، **الفيلم التسجيلى**
ستانلى جيه سولومون، **أنواع الفيلم الأمريكى**
جوزيف وهارى فيلدمان، **دينامية الفيلم**
قدرى حفنى، **الإنسان المصرى على الشاشة**
مونى براح، **السينما العربية من الخليج إلى المحيط**
حسين حلمى المهندس، **دراما الشاشة: بين النظرية والتطبيق للسينما والتليفزيون (٢ج)**
جان بول كولين، **السينما الإثنوجرافية سينما الغد**
لويس هيرمان، **الأسس العملية لكتابة السيناريو للسينما والتليفزيون**
موريس إدجار كواندرو، **نظرات فى الأدب الأمريكى**
جوديث ويستون، **توجيه الممثل فى السينما والتليفزيون**
أحمد الحضرى، **تاريخ السينما فى مصر ج٢**

• ثامن عشر: كتب غيرت الفكر الإنسانى

سلسلة لتلخيص التراث الفكرى الإنسانى فى صورة عروض موجزة لأهم الكتب التى ساهمت فى تشكيل الفكر الإنسانى وتطوره مصحوبة بتراجم لمؤلفيه وقد صدر منها ١٠ أجزاء.

- **تاسع عشر: الأعمال المختارة**

يوهان هويزنجا، **أعلام وأفكار**

د.مصطفى طه بدر، **محنة الإسلام الكبرى**

ت. كويلر ينج، **الشرق الأدنى**

جيمس نيومان؛ ميشيل ويلسون، **رجال عاشوا للعلم**

ابن زنبل الرمال ، **آخرة المماليك**

د.محمد عوض محمد ، **نهر النيل**

آرثر كريستنسن، **إيران فى عهد الساسانيين**

أوجست دييس، **أفلاطون**

يعقوب فام، **البراجماتية**

بلوطرخوس، **العظماء**

آدم متز، **الحضارة الإسلامية (٢ج)**

تشارليز ديكنز، **مذكرات بكويك جـ١**

روبرت ديبوجراند وآخرون ، **مدخل إلى علم لغة النص**

محمد كرد على، **بين المدنية العربية والأوربية**

ولفرد جوزف دللى، **العمارة العربية بمصر**

مطابع الهيئة المصرية العامة للكتاب

ص. ب : ٢٣٥ الرقم البريدى : ١١٧٩٤ رمسيس

WWW. egyptianbook. org. eg

E - mail : info @egyptianbook.org. eg

إن قرب الشمس من كوكبنا (فهى تقع على بعد ١٥٠ مليون كيلو متر) يجعل شدة سطوع سطحها عالية جدا، بحيث تساعد على إخفاء المعالجات التى تتم فى أعماقها مولدة كميات ضخمة من الطاقة. ويصف لنا الكتاب ما يحدث فى قلب الشمس، فقد كانت رؤية قلب الشمس وإجراء قياسات مباشرة للظروف هناك حلما صعب التحقيق بالنسبة لرواد الفيزياء الفلكية، لكنه أصبح حقيقة بفضل تضافر وتنافس جهود العلماء فى مجال علم الزلازل الشمسية والفيزياء النووية والفيزياء الفلكية بالطبع.

ويحدثنا هذا الكتاب عن جسيمات تحت نووية تحيط بنا ولا نشعر بوجودها، مثل النيوترينو، والويمب، وأخرى غيرهما. كما يكشف لنا كيف أن الشمس تتنفس وترتجف. ولا يكتفى هذا الكتاب بأن يحكى لنا قصة كيف بدأ رواد الفيزياء الفلكية فى كشف أسرار الشمس، بل إنه يوضح الطريق إلى سبر قلب الشمس فى العقود القادمة. كما يجيب بأسلوبه المشوق عن العديد من الأسئلة عن حياة الشمس، مثل: كيف تحتفظ بحرارتها؟ ومم تتكون؟ وما التفاعلات التى تجرى فى قلبها؟ وكم عمرها؟ وإلى متى ستظل تبعث بأشعتها إلى كوكبنا؟

جون جريبين من أكثر الكتاب العلميين انتشارا لما يتميز به من أسلوب جذاب وحس ساخر، حصل على العديد من الجوائز عن كتاباته العلمية فى مجال الفيزياء والفلك والفيزياء الفلكية، فى كل من بريطانيا والولايات المتحدة.

تصميم: محسنة عطية تنفيذ جرافيك: هند عبد الجواد

ISBN# 9789774204938

6 221149 009387

الهيئة المصرية العامة للكتاب

٩,٥ جنيه